

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DOBLE
CUBIERTA VENTILADA PARA REDUCIR LA TRANSMISIÓN
DE CALOR AL INTERIOR DE LA VIVIENDA MEDIA EN
PUERTO VALLARTA, JALISCO.**

Sandra Elisa Rodríguez Trejo

Tesis para optar por el grado de Maestra en Diseño Bioclimático

Miembros del jurado:

Mtro. Héctor Valerdi Madrigal
Director de ICR

Dr. Pablo David Elías López
Mtra. Gloria Ma. Castorena Espinosa
Mtro. Edwin Israel Tovar Jiménez
Dr. Luis Gabriel Gómez Azpeitia

Ciudad de México

Febrero de 2017

A mi abuelita Bertha

*“Usted está aquí, igual que yo y con mayor intensidad aún;
allí donde yo estoy, está usted, como yo y más intensamente aún.”*
—*Franz Kafka*

Agradecimientos

*A mi familia: Javier, Rosa María y Sara,
por su apoyo invaluable y ayuda en la realización de este proyecto.*

*A mi demás familia: todos mis primos, tíos y a mis abuelos
por mantener abiertas para mí las puertas de sus casas
y brindarme apoyo y cariño durante esta etapa.*

*A mi otra familia: mis amigos, porque a pesar de la distancia
siempre han estado animándome a seguir mis planes.*

*A mi director de Tesis el Mtro. Héctor Valerdi por
compartir conmigo sus experiencias y conocimientos.*

*A mis maestros y compañeros de la maestría,
por inspirarme y motivarme a seguir en el camino del quehacer
arquitectónico con entusiasmo y compromiso.*

Gracias a todos.

Resumen

El buen desempeño térmico de las cubiertas de los edificios en climas cálidos es un requerimiento importante para garantizar condiciones adecuadas de confort térmico del usuario al interior del espacio habitable. Las cubiertas son el elemento de la envolvente que recibe la mayor parte de la radiación solar, lo que puede ocasionar el sobrecalentamiento del ambiente interior.

Una cubierta energéticamente eficiente debe reflejar tanta radiación solar como sea posible y emitir el calor absorbido rápidamente, una solución de acondicionamiento pasivo útil para frenar las ganancias de calor a través de los techos son los sistemas de doble cubierta ventilada, los cuales posibilitan la reducción de los flujos de calor transmitidos por las estructuras expuestas a la radiación solar, gracias al efecto combinado del sombreado de las superficies y del calor extraído por el flujo de aire.

En este trabajo se evalúa cómo pueden reducirse las ganancias térmicas en el techo y mejorar el ambiente térmico interior mediante la adaptación de un sistema de doble cubierta ventilada con lámina metálica, el cual es un material altamente emisivo y con altos valores de reflectancia solar.

Esta Tesis es un estudio experimental descriptivo del comportamiento térmico de un sistema de doble cubierta ventilada utilizando lámina metálica con dos diferentes orientaciones. A través del monitoreo de módulos experimentales ubicados en la ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco, se obtuvieron datos de temperaturas de los componentes del sistema constructivo propuesto, y los datos meteorológicos relativos a doce días del periodo de invierno y doce días en el periodo de primavera.

En el análisis del comportamiento térmico se comparan las temperaturas obtenidas en cada módulo experimental, relacionándolos con la temperatura ambiental y un módulo de control. Los elementos de análisis corresponden a las temperaturas características, el confort térmico, y la temperatura de la superficie interior del sistema de doble cubierta.

Comparándose el sistema de doble cubierta ventilada con una losa plana de concreto, se concluye que el sistema propuesto es térmicamente más favorable o eficiente, tanto durante el invierno como durante la primavera, ya que permite el amortiguamiento de la temperatura interna gracias a que provee sombra al techo principal y refleja gran parte de la radiación solar directa.

Se espera que los resultados obtenidos aporten información importante sobre el comportamiento térmico de las cubiertas en el clima cálido húmedo, contribuyendo a una mejora en la calidad del ambiente térmico interior de las viviendas y el bienestar de sus ocupantes.

Índice general

Introducción	11
Planteamiento del problema	12
Preguntas de investigación	13
Hipótesis	13
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos particulares	14
Justificación	15
Procedimiento	16
Desarrollo del documento	17
Resultados y aportaciones	18
Marco Teórico	19
Estado del arte	19
Estudios sobre sistemas de doble cubierta ventilada	19
Estudios sobre cubiertas metálicas con ventilación	24
Marco conceptual	28
Soluciones de diseño de cubiertas adoptadas en respuesta al clima cálido húmedo	32
Sistemas pasivos de enfriamiento en cubiertas	33
Sombreado del techo	34
Enfriamiento evaporativo indirecto	34
Enfriamiento radiativo	36
Superficies reflectantes	37
Definición y características constructivas de los sistemas de doble cubierta ventilada	39
La doble cubierta ventilada en la arquitectura vernácula tropical	43
Cubiertas metálicas en la vivienda tropical	45
La doble cubierta ventilada con lámina metálica en la arquitectura contemporánea	47
Ventajas y propiedades de las cubiertas metálicas	48
El comportamiento térmico de las cubiertas	50
Procesos de transferencia de calor a través de la cubierta	50
Conducción	51
Convección	52
Radiación	53
El efecto térmico de los materiales	55
Posición respecto al Sol e intensidad de radiación	56

Análisis del sitio y del entorno	58
El medio natural	58
El sitio.....	58
Climatología y Geometría solar	59
El medio artificial.....	65
Infraestructura y equipamiento	65
Vivienda	65
Antecedentes arquitectónicos	66
El medio socio-cultural.....	66
Demografía y sociedad	66
Economía	67
Marco metodológico	68
Diseño de la experimentación	68
Descripción de los módulos experimentales.....	68
Descripción de equipo de medición	70
Procedimiento experimental	71
Elementos de análisis	72
Descripción de experimentos	74
Fase Uno: Selección del color de la superficie del techo	74
Fase Dos: Evaluación del sistema de doble cubierta en invierno	75
Fase Tres: Evaluación del sistema de doble cubierta en primavera	76
Análisis de resultados	78
Temperaturas Características y Confort térmico	78
Fase Uno.....	78
Fase Dos	82
Fase Tres	89
Temperatura de la superficie interior del techo	96
Fase Uno.....	96
Fase Dos	98
Fase Tres	100
Síntesis y discusión de resultados.....	102
Conclusión.....	107
Propuesta de diseño	110
Bibliografía.....	113
Anexos.....	119

Anexo 1: Prueba piloto: Transferencia de calor a través de la lámina galvanizada.....	119
Anexo 2: Variaciones porcentuales de la energía sobre un techo inclinado proveniente de la radiación solar directa.	123
Anexo 3: Simulación del flujo de viento a través de los módulos experimentales	125
Anexo 4: Temperatura superficial de la lámina metálica.....	127

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución del consumo de energía eléctrica en casas habitación en clima cálido en México..	15
Figura 2. Efecto de la utilización del techo escudo en un espacio cerrado (sin ventilación).	19
Figura 3. Techo ventilado de losa de hormigón armado y sobrecubierta metálica.	20
Figura 4. Temperatura media interior para los diferentes materiales constructivos y diferentes incrementos de aire en cubierta ventilada.	21
Figura 5. Sección horizontal de los modelos de cubierta. Modelo de panel con cavidades de 90 mm y 30 mm, Panel con cavidades de 180 mm x 30 mm.	22
Figura 6. Resultados experimentales para la ventilación de la cavidad. Variación de la temperatura en la cavidad, la distribución de la temperatura en la mitad de la cavidad.....	22
Figura 7. Conformación básica del sistema de techo de lámina metálica SITECH.....	24
Figura 8. Rangos de eficiencia de las diferentes variables de configuración de cubiertas ventiladas metálicas en la disminución de flujos de calor al interior de los edificios..	25
Figura 9. Celdas experimentales de ático con diferentes materiales y termografía durante el verano de 2002.....	26
Figura 10. Comparación de temperaturas de sensación en diferentes configuraciones de cubierta metálica.	27
Figura 11. Ejemplos de techos sombreados con cubierta vegetal, vasijas de barro y cubierta sólida	34
Figura 12. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto. Techo estanque sombreado, rocío de agua y aislamiento flotante	35
Figura 13. Funcionamiento diurno y nocturno del sistema de techo-estanque.	36
Figura 14. Cubierta metálica con aislante móvil.	37
Figura 15. Efecto albedo	38
Figura 16. Ejemplos de cubiertas ventiladas. Ático ventilado, cubierta inclinada con ventilación sofito-cumbrera y techo plano con cubierta secundaria y ventilación cruzada.....	39
Figura 17. Mecanismos de transferencia de calor en la doble cubierta.....	40
Figura 18. Tipos de ventilación en cubiertas.....	41
Figura 19. Vivienda tradicional de la etnia Cham, Vietnam.	43
Figura 20. Aberturas de ventilación en el techo de la casa tradicional malaya.	44

Figura 21. Cubiertas dobles en el pueblo Masa (Camerún) y Orisa (India).	44
Figura 22. Vivienda popular en República Dominicana	45
Figura 23. Viviendas en Chetumal, México y en Corozal.	46
Figura 24. Ejemplos de uso de láminas metálicas en sistemas doble cubierta para climas cálidos.	47
Figura 25. Transmisión de calor en los edificios.	51
Figura 26. Transmisión de calor por conducción	52
Figura 27. Transferencia de calor por convección entre un fluido y una superficie.....	53
Figura 28. Intercambio radiante: en una superficie; entre una superficie y el medio que lo rodea	54
Figura 29. Localización de Puerto Vallarta.	58
Figura 30. Gráfica Solar equidistante Latitud 20°, para Puerto Vallarta.	63
Figura 31. Distribución de la dirección del viento.....	64
Figura 32. Características del módulo experimental.	68
Figura 33. Características geométricas de la segunda cubierta.....	69
Figura 34. Módulos experimentales (ME1 y ME2) y módulo de control (ME3).	69
Figura 35. Data loggers modelo EL-USB-2 y EL-USB-TC-LCD.	71
Figura 36. Módulos ME1, ME2 y ME3 durante la Fase Uno.....	74
Figura 37. Caja de data logger para registro de las condiciones medioambientales.	74
Figura 38. Hoja de registro del experimento durante la Fase Dos.	75
Figura 39. Hoja de registro del experimento durante la Fase Tres.....	76
Figura 40. Disposición de módulos experimentales para el desarrollo del experimento.	77
Figura 41. Módulo de doble cubierta de lámina metálica.	110
Figura 42. Esquema de mecanismo plegable del sistema de doble cubierta.....	111
Figura 43. Aplicación del sistema de doble cubierta en una vivienda media.	112
Figura 44. Montaje de prueba piloto.	119
Figura 45. Simulación del flujo del viento sobre el módulo ME1.	125
Figura 46. Simulación del flujo del viento sobre el módulo ME2.	126

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Promedio de temperatura mensual en Puerto Vallarta.	60
Gráfica 2. Promedio de humedad relativa mensual en Puerto Vallarta.	60
Gráfica 3. Precipitación total y Evaporación promedio mensual en Puerto Vallarta.....	61
Gráfica 4. Índice ombrotérmico mensual en Puerto Vallarta.	62
Gráfica 5. Promedio de radiación solar mensual en Puerto Vallarta.	62
Gráfica 6. Viviendas particulares habitadas según material en techos, Puerto Vallarta	66

Gráfica 7. Resultados del monitoreo de temperatura del ME1.	78
Gráfica 8. Resultados del monitoreo de temperatura en el ME2.	79
Gráfica 9. Resultados del monitoreo de temperatura en el ME3.	80
Gráfica 10. Diferencia de temperaturas en superficies internas	81
Gráfica 11. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME1 durante la Fase Dos.	82
Gráfica 12. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME2 durante la Fase Dos.	83
Gráfica 13. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME3 durante la Fase Dos.	84
Gráfica 14. Humedad Relativa promedio horaria durante la Fase Dos.	84
Gráfica 15. Gráfica comparativa de resultados obtenidos en la Fase Dos.	85
Gráfica 16. Temperaturas horarias registradas en el ME1 durante la Fase Dos.	86
Gráfica 17. Temperaturas horarias registradas en el ME2 durante la Fase Dos.	87
Gráfica 18. Temperaturas horarias registradas en el ME3 durante la Fase Dos.	88
Gráfica 19. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME1 durante la Fase Tres.	89
Gráfica 20. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME2 durante la Fase Tres.	90
Gráfica 21. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME3 durante la Fase Tres.	91
Gráfica 22. Humedad Relativa promedio horaria durante la Fase Tres.	91
Gráfica 23. Gráfica comparativa de resultados obtenidos en la Fase Tres.	92
Gráfica 24. Temperaturas horarias registradas en el ME1 durante la Fase Tres.	93
Gráfica 25. Temperaturas horarias registradas en el ME2 durante la Fase Tres.	94
Gráfica 26. Temperaturas horarias registradas en el ME2 durante la Fase Tres.	95
Gráfica 27. ΔT en el ME1 con la superficie externa de la losa en color blanco.	96
Gráfica 28. ΔT en el ME2 con la superficie externa de la losa en color plata.	97
Gráfica 29. ΔT en el ME3 con la superficie externa de la losa en color terracota.	97
Gráfica 30. ΔT obtenida en el ME1 durante la Fase Dos.	98
Gráfica 31. ΔT obtenida en el ME2 durante la Fase Dos.	99
Gráfica 32. ΔT obtenida en el ME3 durante la Fase Dos.	99
Gráfica 33. ΔT obtenida en el ME1 durante la Fase Tres.	100
Gráfica 34. ΔT obtenida en el ME2 durante la Fase Tres.	101
Gráfica 35. ΔT obtenida en el ME3 durante la Fase Tres.	101
Gráfica 36. Diferencia entre la temperatura interna de la losa y la temperatura ambiente en invierno.	104
Gráfica 37. Diferencia entre la temperatura interna de la losa y la temperatura ambiente en primavera.	105
Gráfica 38. Registro de temperaturas en el módulo experimental de la prueba piloto.	121
Gráfica 39. Energía solar directa sobre un techo inclinado 15° a una latitud de 20°N	123
Gráfica 40. Energía solar directa sobre un techo inclinado 30° a una latitud de 20°N	123
Gráfica 41. Energía solar directa sobre un techo inclinado 45° a una latitud de 20°N	124
Gráfica 42. Temperatura superficial de la lámina metálica en primavera.	127

Índice de Tablas

Tabla 1. Índice de Reflectancia Solar (SRI) de materiales típicos para techos.	38
Tabla 2. Temperaturas promedio diarias registradas durante la Fase Uno.	102
Tabla 3. Temperaturas promedio diarias registradas durante la Fase Dos.	103
Tabla 4. Temperaturas promedio diarias registradas durante la Fase Tres.	103
Tabla 5. Tabla de síntesis de resultados.	106

Introducción

En regiones con climas cálidos y húmedos, como es el caso de numerosas localidades de la República Mexicana, las envolventes de los edificios tienen la importante función de reducir los efectos que la radiación solar tiene sobre ellos, y por lo tanto deben recibir atención especial. Se considera que en este tipo de climas, la ventilación y una envolvente adecuada que evite el exceso de calor hacia el interior de las construcciones, son elementos fundamentales para el bienestar climático (Fajardo, 2005).

La cubierta es un elemento clave en la transferencia de calor entre el interior y el exterior de los edificios por estar sujeta a las mayores fluctuaciones térmicas: durante el día alcanza elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación solar, y durante la noche es la parte de la construcción que más calor pierde, por irradiación hacia el espacio. Controlando la radiación solar que recibe la cubierta, podemos controlar las condiciones climáticas de los espacios interiores (Olgyay, 1998), una cubierta energéticamente eficiente debe reflejar tanta radiación solar como sea posible y emitir el calor absorbido rápidamente.

De acuerdo con el INEGI¹, los materiales de construcción para cubiertas comúnmente utilizados en las viviendas de la República Mexicana son: en primer lugar, el concreto o viguetas con bovedilla, y en segundo la lámina metálica. En las zonas con climas cálidos y húmedos, estos materiales no son la opción más adecuada para evitar el exceso de calor al interior de las edificaciones debido a su alta admitancia² y conductividad térmica, por lo tanto su uso requiere la aplicación de estrategias de diseño bioclimático para evitar el desconfort térmico en los usuarios y con ello el mayor uso de energía eléctrica para climatización artificial.

Es fundamental disminuir el aporte de calor por radiación y propiciar la ventilación para disiparlo, bajo estas condiciones, lograr el sombreado adecuado y favorecer el paso libre del aire son condiciones recomendables para la solución del sistema constructivo, en el cual una doble cubierta ventilada es una opción viable y eficiente si sus características son diseñadas adecuadamente.

El propósito de este trabajo es el diseño y análisis experimental del comportamiento térmico de un sistema de doble cubierta ventilada incorporando criterios de acondicionamiento pasivo y el uso de los materiales más comunes para la construcción de cubiertas. El objetivo es evaluar su aplicación en la reducción de las ganancias térmicas por radiación solar directa en las cubiertas de la vivienda media, en el clima cálido húmedo de la ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco.

¹ Censo de Población y Vivienda 2010.

² Característica que presenta una superficie de recibir calor del aire o suministrar calor hacia el aire bajo variaciones cíclicas de temperatura. La admitancia es el flujo de calor en watts por m² de superficie y por grado de diferencia de temperatura entre el aire y la superficie (W/m² °C). (Evans & De Schiller, 1991)

Planteamiento del problema

La explosión demográfica de la década de los ochenta duplicó el número de residentes y visitantes de Puerto Vallarta, y con ello se inició el auge de construcción que persiste al día de hoy (el número de viviendas totales aumentó 25.2% en cinco años³), mismo que ha dado por resultado desarrollos de vivienda en serie donde se han aplicado modelos constructivos que no contemplan la realidad climática local.

Una vivienda sin diseño adecuado, en términos de protección térmica, emplazada en un clima cálido, requerirá de la implementación posterior de sistemas de aire acondicionado, que según estadísticas de la Secretaría Nacional de Energía son la principal causa de consumo de energía eléctrica en la zona norte y las costas del país. (Galindo, 2010)

Un estudio de mercado realizado en 2007 por la empresa Consultoría y Asesoramiento Integral CAI S. C., detectó que de la oferta de casas en desarrollos habitacionales que se ubican en el municipio de Puerto Vallarta, el 80% son de tipo medio (Virgen & Gauna, 2011). Las configuraciones espaciales y características constructivas de este tipo de viviendas traen como resultado condiciones térmicas desfavorables en los meses de primavera y verano, repercutiendo directamente en problemas como el sobrecalentamiento del ambiente interior y el aumento del gasto energético.

En zonas con climas tropicales, como es el caso de Puerto Vallarta, la cubierta es el componente de las edificaciones con mayor carga térmica debido a que los rayos solares inciden en ángulos verticales e intensamente durante casi todo el año. La cubierta, que es por sí misma un elemento de protección a la radiación, queda expuesta en la mayoría de los casos a un sobrecalentamiento que puede registrar temperaturas superficiales de entre 75°C y 80°C durante el verano (Gagliano et al, 2012), conduciendo este calor al interior del recinto.

De acuerdo con datos reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los materiales para cubiertas utilizados en más del 80% del total de las viviendas en Puerto Vallarta son la losa de concreto y terrado con viguería, le siguen en importancia los techos de lámina metálica y de asbesto. Por sus características termo-físicas el uso de estos materiales requiere la aplicación de técnicas de acondicionamiento pasivo para evitar su sobrecalentamiento y la transmisión de calor en exceso al interior de la vivienda.

Dado que la cubierta de la vivienda es el elemento de la envolvente que recibe la mayor cantidad de radiación solar, es necesario disminuir el flujo de calor transferido a través de ella, razón por la cual se propone un sistema de doble cubierta ventilada basado en un sistema constructivo de fácil implementación utilizando lámina de metal galvanizado.

³ Entre 2005 y 2010. Fuente: CONAVI, 2016.

Preguntas de investigación

- ¿Cómo se comportan las temperaturas superficiales de una cubierta de concreto expuesta a la radiación solar directa?
- ¿Cómo y cuándo la temperatura superficial interior de la cubierta está dentro de los límites admisibles para que se propicien las condiciones adecuadas de confort térmico al interior de la vivienda?
- ¿Es posible disminuir la cantidad de radiación absorbida por el techo de la vivienda mediante la incorporación de una segunda cubierta de lámina metálica en un clima cálido húmedo?
- ¿Cuál es la mejor inclinación y orientación para el sistema de doble cubierta ventilada en la latitud de la región de estudio?
- ¿La lámina metálica es un material conveniente para utilizarse como segunda cubierta en el clima cálido húmedo?
- ¿Cuál es el papel de la cámara de aire ventilada en el diseño del diseño pasivo de la doble cubierta?
- ¿Cuál es la altura adecuada de la cámara ventilada entre cubiertas?
- ¿Los sistemas de doble cubierta representan una mejora para las condiciones de confort térmico al interior de un espacio?

Hipótesis

En el clima cálido húmedo los edificios están sujetos a significativos requerimientos de enfriamiento debido a la intensidad del calor transmitido a través de la envolvente del edificio, principalmente en la cubierta. Es posible lograr la reducción del flujo de energía térmica transferida a través de la cubierta por medio de un sistema de doble cubierta ventilada, basado en la reflexión de gran parte de la radiación solar directa, el sombreado del techo principal y la disipación del calor por la ventilación entre cubiertas.

La lámina metálica como segunda cubierta es efectiva en el clima cálido húmedo, su implementación en el sistema de doble cubierta ventilada mejorará el comportamiento térmico interior de la edificación al obtener lo siguiente:

- Disminuir la temperatura interior de la cubierta principal en comparación con la temperatura del aire exterior en al menos 4°C durante las horas de mayor insolación.
- Amortiguar el impacto de la radiación solar directa sobre la cubierta principal, evitando su sobrecalentamiento y disminuyendo la amplitud de la variación de la temperatura interior.
- Proporcionar una temperatura interior de la cubierta cercana a la temperatura de confort del usuario.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema de doble cubierta ventilada con lámina metálica para minimizar el impacto de la radiación solar directa sobre la cubierta y disminuir la transferencia de calor al interior de la vivienda media en Puerto Vallarta, Jalisco.

Objetivos particulares

- Identificar los sistemas constructivos de cubierta más utilizados actualmente en las viviendas de la ciudad de Puerto Vallarta.
- Analizar los fundamentos de los sistemas de doble cubierta ventilada y sus características constructivas en climas cálido-húmedos.
- Proponer alternativas para la conformación del sistema de doble cubierta ventilada y definir los criterios para el diseño de sus características geométricas.
- Determinar el efecto térmico que tiene el estado superficial de la doble cubierta en función de su índice de absorción ante la radiación solar, de su orientación, y de su inclinación respecto a la horizontal.
- Examinar el comportamiento térmico de la lámina metálica con acabado en color blanco en el clima cálido húmedo y su potencial de uso en sistemas de enfriamiento radiativo en dicho clima.
- Analizar el comportamiento térmico del espacio ventilado y su efecto en la disipación de calor.
- Realizar una evaluación comparativa de diferentes configuraciones del sistema de doble cubierta a fin de identificar y recomendar aquellas más eficientes en la reducción de la transmisión de calor.
- Ejecutar el diseño de un sistema de doble cubierta ventilada con características modulares que pueda implementarse sobre cualquier techo plano existente.

Justificación

Resulta innegable el impacto ambiental que se genera en las viviendas de manera cotidiana, se estima que el sector mexicano de vivienda produce el 32% de las emisiones de gases de efecto invernadero en México, lo que representa el 16.2% del consumo total de energía y el 26% del consumo total de electricidad (CONAVI, 2013). Aunado a esto, el aire acondicionado representa el 55% del consumo energético de una vivienda en clima cálido (Figura 1).

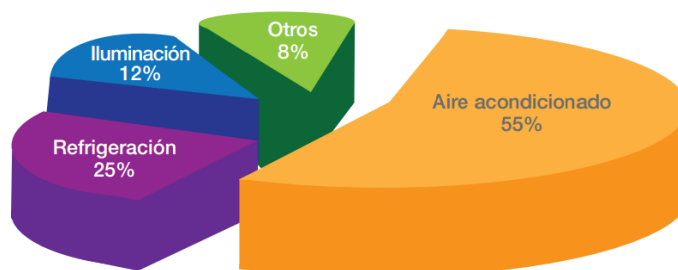


Figura 1. Distribución del consumo de energía eléctrica en casas habitación en clima cálido en México. Fuente: Olivera, 2008.

La necesidad de acondicionamiento climático que requieren la mayoría de las viviendas, ocasionado por desconocimiento en los procesos de diseño y construcción en cuanto al control microclimático por parte de los diseñadores y desarrolladores de vivienda, trae como consecuencia el aumento del gasto energético en las viviendas en Puerto Vallarta y probablemente en muchas otras regiones del país.

Existen diversas razones que justifican el estudio experimental de las cubiertas, entre las que destaca el hecho de que son los elementos más soleados de los edificios, especialmente durante el verano, y están expuestos al enfriamiento nocturno por irradiación. Además, la comodidad térmica bajo las cubiertas está afectada por las altas temperaturas que puede alcanzar la superficie exterior (más de 50°C), el retardo de la onda de calor (máximo al anochecer) y por el predominio del flujo por irradiación (75%) directo sobre los ocupantes (Martín, 1996).

Estudios realizados por P. O. Fanger et al (1985) demostraron que una persona presentará mayor discomfort térmico al estar expuesta a superficies calientes por encima de la cabeza que si se expone a superficies frías verticales en relación a la asimetría radiante térmica⁴. Las ganancias de calor a través de la cubierta elevan la temperatura superficial del techo y causan cargas de calor radiante en los ocupantes (Kabre, 2010).

El diseño de edificios en lugares con clima cálido no extremo requiere sistemas de adecuación climática para evitar que se sobrecaliente el edificio (Givoni, 1998 citado por Vázquez et al, 2008) y propiciar que su carga térmica se minimice, manteniendo la frescura de los espacios. Dentro de los sistemas pasivos

⁴ La asimetría radiante se presenta cuando una persona en un espacio con varias superficies a su alrededor, percibe una superficie más fría o caliente que las demás superficies que la rodean. (Mercado et al, 2010).

de climatización que cumplen con esta función, se cuenta con los Sistemas de Descarga de Calor (SDC), los cuales permiten captar el flujo de calor que recibiría la envolvente de una edificación, y que ocasionaría el aumento de temperatura del aire interior, para descargarlo al medio ambiente y mejorar las condiciones de confort térmico del usuario (Hernández et al, 2012).

Los sistemas de doble cubierta ventilada son un tipo de SDC empleado en los techos, el propósito general que se persigue con su aplicación es evitar el sobrecalentamiento del aire en el espacio habitable respecto a la temperatura del ambiente exterior. En este trabajo se propone un método pasivo simple para reducir la transferencia de calor utilizando una segunda cubierta de lámina metálica que provea de sombra al techo principal y refleje gran parte de la radiación solar.

Se sabe que los metales tienen una excelente propiedad física para conducir el calor, lo que no los hace justamente el material más idóneo para las cubiertas en climas cálidos, el calor irradiado es uno de los grandes problemas ya que en general no se toma ninguna previsión al respecto. Sin embargo las propiedades termo-físicas de las láminas metálicas, como el tiempo de retardo térmico reducido y altos valores de emisividad y reflectancia solar, pueden utilizarse en favor del control climático en cubiertas si sus características geométricas (orientación e inclinación) son diseñadas apropiadamente.

Los techos livianos metálicos poseen un potencial para utilizarse como un tipo de sistemas de enfriamiento radiativo, basándose en el aprovechamiento del enfriamiento producido durante la noche en la lámina metálica y su recubrimiento con un acabado de alta emisividad en el espectro infrarrojo largo.

La conformación adecuada de estas cubiertas metálicas para obtener condiciones favorables dentro de los límites del confort en clima cálido húmedo se justifica mediante un diseño modular que permita su instalación sobre techos existentes sin la necesidad de una modificación estructural, implementando el control solar y un buen uso de la ventilación natural.

Procedimiento

Se realizó la consulta y análisis de una amplia recopilación bibliográfica de investigaciones hechas en el campo de la transferencia de calor a través de las cubiertas y de las mejoras del comportamiento térmico de las mismas, poniendo especial atención en los modelos de cálculo y experimentación, así como en investigaciones sobre sistemas de doble cubierta ventilada en climas cálidos. Esto permitió obtener la información necesaria para estructurar el marco teórico y conceptual de la investigación.

Partiendo del material bibliográfico analizado, se definió el método experimental y los objetos de estudio: las configuraciones y materiales del sistema de doble cubierta a comparar, de esta manera se adecuó el modelo de recopilación de datos y tratamiento de la información apropiado para este estudio.

Con el fin de evaluar el sistema de doble cubierta ventilada se realizó una investigación de tipo experimental descriptiva que consistió en registrar en campo el comportamiento térmico de módulos experimentales, para posteriormente ser analizado y realizar un esquema comparativo de las variables, con la intención de definir la configuración de doble cubierta más eficiente para la reducción de la transmisión de calor al interior y generar recomendaciones para su diseño y aplicación.

La realización de este estudio permitió generar conclusiones sobre los procesos de transferencia de calor a través de las cubiertas de concreto en el clima cálido húmedo de Puerto Vallarta, así como sobre el comportamiento térmico de la lámina metálica en dicho clima y su potencial de aplicación en los sistemas de doble cubierta ventilada.

Desarrollo del documento

El punto de partida de la investigación es el análisis del estado de conocimiento actual de los procesos físicos de transferencia de calor en la envolvente de las edificaciones, de esta manera se presenta el segundo capítulo de este documento, donde se describen algunos estudios representativos sobre los sistemas de doble cubierta ventilada, aportaciones científicas a las que se dedica atención especial, y se definen los conceptos básicos comúnmente utilizados en el análisis de los procesos de transmisión de calor.

La estructura de los siguientes capítulos desglosa el proceso sistemático de elaboración de este trabajo, sintetizado en una serie de etapas lógicas. Es en los capítulos tercero y cuarto donde se desarrolla la investigación, tratando los temas que la fundamentan como son el comportamiento térmico de las cubiertas y las soluciones de diseño de cubiertas adoptadas en respuesta al clima cálido húmedo.

Después, en el quinto capítulo se presenta el análisis del sitio y el entorno donde se desarrolló la experimentación, y se definen los parámetros que caracterizan el bienestar y el confort del usuario en el clima en cuestión. El sexto capítulo corresponde al marco metodológico, donde se describe el desarrollo de la fase experimental, incluyendo el equipo, procedimiento y elementos de análisis.

El séptimo capítulo está dedicado al análisis de los resultados obtenidos durante la experimentación, que dan pie a las conclusiones generales que se desprenden de este trabajo de investigación y se presentan en el octavo capítulo del documento. Por último se muestra una propuesta de diseño de una doble cubierta ventilada de lámina metálica implementada sobre una vivienda tipo.

Resultados y aportaciones

Se considera que esta investigación es un aporte al estudio de la transferencia de calor a través de las cubiertas en el clima cálido húmedo. El análisis realizado a los sistemas de doble cubierta ventilada demuestra que son una alternativa eficiente para el control de la temperatura al interior del espacio habitable y pueden repercutir directamente en el ahorro de energía para climatización.

Esta investigación presenta el diseño de un sistema de doble cubierta ventilada de lámina metálica, un sistema constructivo de fácil implementación tanto en nueva construcción como sobre cubiertas ya existentes, y expone el potencial que tiene en la reducción del efecto de la radiación solar directa sobre los techos de la vivienda media en la ciudad de Puerto Vallarta, así como otras ventajas en términos de estética, sustentabilidad, eficiencia energética y confort de los usuarios.

Marco Teórico

Estado del arte

Existen numerosas investigaciones sobre los sistemas de doble cubierta ventilada, de acuerdo con los diferentes autores dichos sistemas también son llamados techo escudo, techo frío o fresco, doble techo, techo sombreado, techo doble capa, o simplemente cubierta ventilada. En este capítulo se describen algunos estudios representativos sobre los sistemas de doble cubierta ventilada donde se analizan sus características constructivas, comportamiento térmico y su potencial de aplicación como sistema de enfriamiento pasivo en climas cálidos.

Estudios sobre sistemas de doble cubierta ventilada

Morillón (1998) realizó un análisis experimental de un doble techo como escudo a la radiación solar durante las condiciones climáticas de verano en la ciudad de Guadalajara, con el objetivo medir el efecto del techo escudo en el amortiguamiento de la temperatura interna de una habitación. En este estudio se analizó el comportamiento térmico de una bóveda catalana sobre la cual se colocó una lámina de asbesto de 5 mm de espesor, inclinada 3° hacia el Este y levantada en ambos extremos para permitir la ventilación.

Algunos de los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2, donde se observa en las gráficas una oscilación de la temperatura interior de 3°C con el techo escudo, y sin él la oscilación es de 7°C con una temperatura máxima de 26.5°C. El estudio concluye que el techo escudo se comporta como un conjunto de capacitores conectados en serie, lo que permite amortiguar la oscilación de la temperatura, este amortiguamiento térmico puede disminuir los picos en las cargas térmicas de un equipo de aire acondicionado, así como la amplitud de la variación de la temperatura del aire en el interior de un espacio.

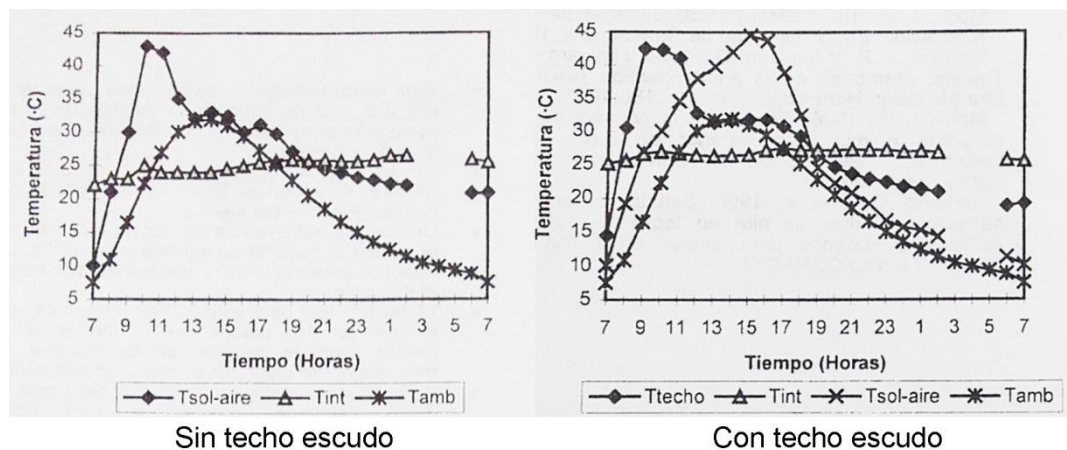


Figura 2. Efecto de la utilización del techo escudo en un espacio cerrado (sin ventilación). Fuente: Morillón, 1998.

En otro análisis realizado por Pilar de Zalazar y Jacobo (2003), se compara el comportamiento higrotérmico de cubiertas ventiladas y no ventiladas para las condiciones climáticas tropicales del noreste argentino. El estudio del comportamiento higrotérmico teórico toma como universo de análisis a los techos de losa maciza, techos con cubierta de tejas cerámicas y techos con cubierta de chapa metálica.

Concluye que todos los tipos de techo analizados comportándose como techos calientes (sin ventilación) o fríos (con ventilación), requieren de aislación térmica para que verifiquen en condiciones mínimas de confort. Reporta que los techos de losa de hormigón armado presentaron mejor comportamiento funcionando como techo frío, al igual que los techos con cubierta de tejas cerámicas, y recomienda que para lograr el correcto comportamiento higrotérmico es necesaria la incorporación de una aislación térmica ubicada por debajo de la cámara de aire ventilada (Figura 3), porque sobre la misma, no colabora con la aislación térmica del componente.

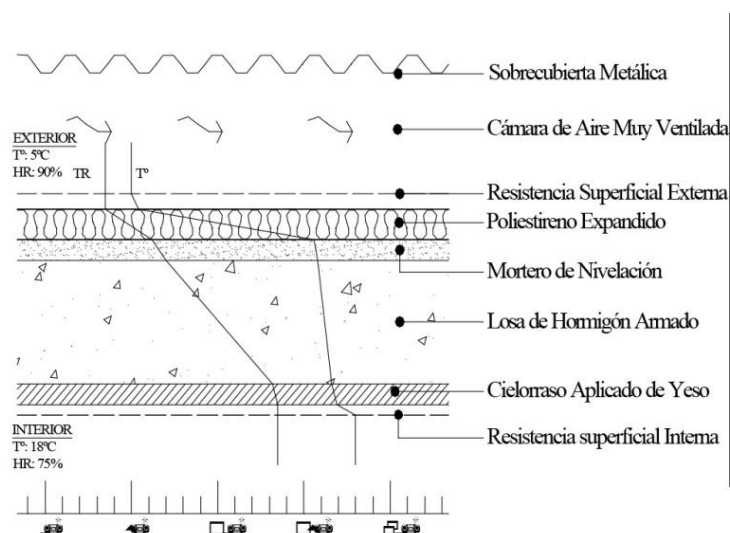


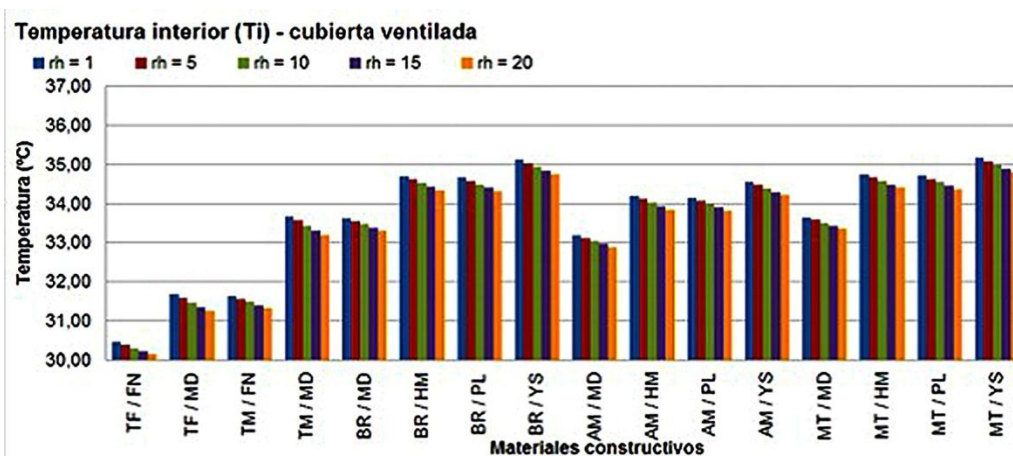
Figura 3. Techo ventilado de losa de hormigón armado y sobrecubierta metálica. Fuente: Pilar, C. & Jacobo, G. (2001).

Shiraishi y Murakami (2004) examinan, mediante simulación acoplada de convección y radiación, cómo la carga de enfriamiento y el ambiente térmico interior de un espacio se pueden mejorar mediante la adaptación de un sistema doble techo con paso de aire. Concluyen que el doble techo se comporta adecuadamente como protección térmica en comparación con un techo común. El rendimiento del blindaje térmico del doble techo resultó de unas 8.6 veces mayor que la de un techo común en las condiciones de su análisis: un clima cálido húmedo del área monzónica asiática.

Guimarães (2008) presenta un estudio donde verifica la eficiencia de diferentes tipologías y materiales de la cubierta ventilada y no ventilada en una ciudad brasileña con clima cálido húmedo. En su análisis, mediante simulaciones numéricas, compara el desempeño térmico de materiales tradicionales (fibra de coco y madera) y materiales contemporáneos (tejas de barro, de amianto y metálica de acero) con

forjados de madera, hormigón, PVC y placas de yeso acartonado, y todas sus composiciones posibles, además de incrementos en los cambios de aire. Los materiales que presentaron mejores resultados en las configuraciones de cubierta ventilada fueron las fibras naturales, seguidos de las cubiertas con tejas de amianto y de acero con forjados interiores de madera (Figura 4). La temperatura interior en un edificio con una cubierta no ventilada puede alcanzar casi los 37°C, como es el caso de la cubierta metálica, aunque la utilización de determinados materiales hace que la temperatura del interior sea más amena, como es el caso de la cubierta de paja de coco, que alcanza una temperatura media interior alrededor de 31°C.

Concluye que el hecho de introducir aire en la cubierta formando una cámara ventilada ayuda a que la temperatura media interior de un local no aumente demasiado con relación a la temperatura media exterior. Además, en este estudio se señala la importancia de la selección de materiales, tanto para la cubierta como para el forjado interior, con coeficientes de absorción (α) y de transmisión de calor (K) bajos.



Teja de fibra natural (TF), Teja de madera (TM), Teja de barro cocida (BR), Teja de amianto (AM), Teja metálica de acero (MT), Forjado de fibra natural (FN), Madera (MD), Forjado de hormigón (HM), plástico PVC (PL) y placas de yeso acartonado (YS).

Figura 4. Temperatura media interior (Ti) para los diferentes materiales constructivos y diferentes incrementos de aire en cubierta ventilada. Fuente: Guimarães, 2008.

Lee et al (2009) afirman que para mejorar la capacidad de protección de un techo frente los perjuicios térmicos ocasionados por el Sol, se puede considerar el uso de una cubierta ventilada, que tiene una capa de ventilación conocida como cavidad, debajo del panel de cubierta de techo. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de factores tales como la ventilación de la cavidad, la pendiente de la cubierta, la intensidad de la radiación solar, el tamaño y la forma de la cavidad (Figura 5), y los perfiles de panel, mediante la investigación del flujo de aire y distribución de la temperatura en la cavidad, en un esfuerzo para mejorar el efecto de enfriamiento de la ventilación en la cavidad de la cubierta. En este trabajo se estudió la influencia de estos elementos en el flujo de aire.

Las evaluaciones se llevaron a cabo por medio de experimentos en laboratorio con diversos materiales para los paneles del techo: tejas de asfalto, barro y hormigón, baldosas, pizarra, madera, tejas de metal, productos sintéticos, algunos sistemas de techos de paneles de metal y productos de fibrocemento, etc. Estos materiales se utilizaron dentro de un módulo experimental, colocados bajo un panel radiador de calor para simular la radiación solar.

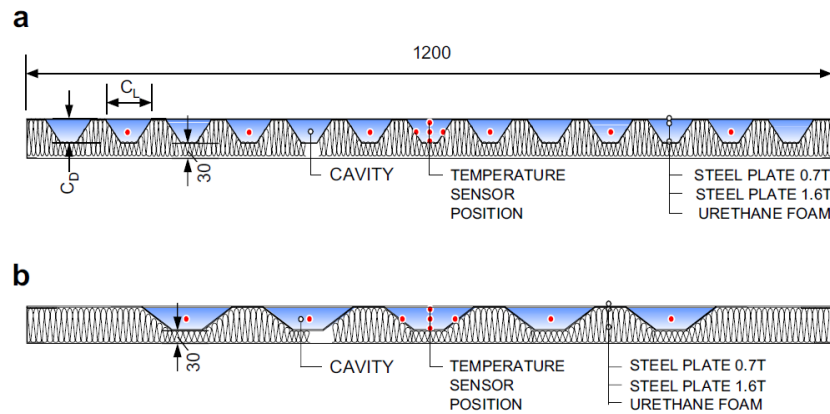


Figura 5. Sección horizontal de los modelos de cubierta. (a) Modelo de panel con cavidades de 90 mm (C_L) y 30 mm (C_D), (b) Panel con cavidades de 180 mm x 30 mm. Fuente: Lee et al (2009).

Durante el experimento se observó que cuando no había ventilación en la cavidad, la temperatura dentro de ella era casi la misma que la del panel de calefacción, alrededor de 65°C. Sin embargo, cuando se permitió la ventilación se produjo un flujo de aire hacia el exterior de la cavidad y la temperatura interna en medio de la cavidad bajó a 27.5°C (Figura 6).

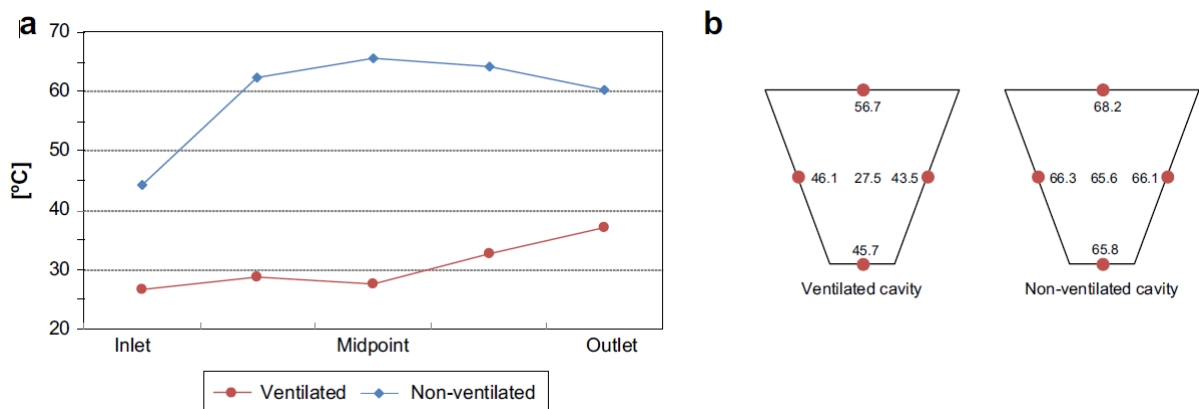


Figura 6. Resultados experimentales para la ventilación de la cavidad. (a) Variación de la temperatura en la cavidad, (b) distribución de la temperatura en la mitad de la cavidad. Fuente: Lee et al (2009).

El estudio concluye que mediante el empleo de una capa de ventilación en el techo se puede evitar la acumulación térmica y disminuir la carga de refrigeración. Dice además, que cuando el ángulo de techo y la forma de una cavidad son los mismos, el aumento de la temperatura de la superficie del techo puede

mejorar el rendimiento de aislamiento de la cubierta ventilada, esto significa que la cubierta ventilada es útil cuando la ganancia de calor solar es alta. Demuestra que cuanto más pronunciada es la pendiente de la cubierta, menor es la temperatura de la cavidad, cuando otros parámetros son los mismos, y enfatiza la necesidad de obtener una profundidad y anchura suficiente de la cavidad para fomentar la velocidad de flujo de aire.

Por su parte Atherton (2011) realizó un estudio paramétrico para mostrar el efecto de la variación del área de ventilación en el comportamiento térmico y de control de la humedad en áticos de construcción estándar, con una segunda cubierta ventilada y con sistemas de barrera radiante, en un clima cálido y húmedo. El estudio demuestra que la variación del área de ventilación tiene un efecto menor sobre el control de la humedad y el comportamiento térmico de las cavidades de los áticos residenciales. En comparación, los áticos equipados con barrera radiante o con doble cubierta ventilada proporcionan un mayor rango de control sobre la infiltración térmica y la humedad. Concluye que la doble cubierta ventilada proporciona mayor reducción en el flujo de calor a través de la cubierta del techo y mantiene menor fluctuación en la temperatura del aire del ático tanto en verano como en invierno.

Gagliano et al (2012) realizaron una investigación cuyo objetivo fue el análisis del comportamiento térmico de cubiertas ventiladas caracterizadas por una colocación diferente del aislamiento térmico respecto a la capa de aire, por medio de simulaciones CFD con el software "Fluent". Se analizó el comportamiento térmico de tres diferentes tipologías de cubiertas ventiladas con el mismo valor de resistencia térmica pero con distinta distribución del aislamiento térmico, durante un día típico de verano.

Los resultados mostraron que el rendimiento de la cubierta ventilada está en función de la posición de la capa de aislamiento térmico, se obtuvo el mejor desempeño colocando el aislamiento térmico debajo de la capa de aire, cerca de la superficie fría. Aseguran que la ventilación de la capa de aire permite una reducción significativa del flujo de calor a través del techo respecto a los techos no ventilados con el mismo valor total de resistencia térmica. El análisis concluye que la ventilación de los techos puede reducir de manera significativa los flujos de calor (hasta 50%) durante la temporada de verano, por lo tanto, en las regiones con alta radiación solar, la ventilación del techo puede ser considerada como una buena y no invasiva técnica para mejorar la eficiencia energética del edificio.

Los estudios anteriormente citados coinciden en que con la ventilación del espacio entre cubiertas se logra un amortiguamiento térmico, al reducir el flujo de calor a través del techo y la oscilación de la temperatura interna del espacio habitable, además de lograr que ésta no rebase la temperatura exterior. En general, puede concluirse que con el uso de sistemas de doble cubierta ventilada en climas cálidos se proporciona a las edificaciones protección contra la radiación solar directa reduciendo así las ganancias térmicas en mejora de la eficiencia energética.

Estudios sobre cubiertas metálicas con ventilación

Se sabe que los metales tienen una excelente propiedad física para conducir el calor, lo que no los hace justamente el material más idóneo para construcción en climas cálidos, sin embargo sus propiedades termo-físicas como el tiempo de retardo térmico reducido y los altos valores de emisividad y reflectancia solar de sus acabados pueden utilizarse en favor del control climático en las cubiertas de las edificaciones, así lo demuestran investigaciones recientes realizadas en este campo, cuyos casos de estudio son cubiertas metálicas con ventilación.

Hernández (1998) presenta el diseño de un de techo en lámina metálica para viviendas económicas en Venezuela, respondiendo a los requerimientos del clima tropical y de resistencia estructural y durabilidad, haciendo énfasis en factores importantes como el confort térmico, la producción y el ensamblaje. El diseño consiste en una correa de techo que permite el anclaje de láminas metálicas planas en su sección superior y en la inferior la colocación de un plafón deslizante de yeso cartón para configurar una cámara de aire ventilada (Figura 7).

En las pruebas térmicas realizadas en un recinto de block de concreto con el sistema de techo en estudio y donde se propició la ventilación cruzada, reporta que la cámara de aire ofrece resistencia al incremento de la temperatura interna en las horas de mayor asoleamiento y, en las horas de menor temperatura, no permite el descenso de la temperatura del recinto a los niveles de la temperatura exterior, por lo que infiere que la cámara de aire tiene un efecto de amortiguamiento térmico.

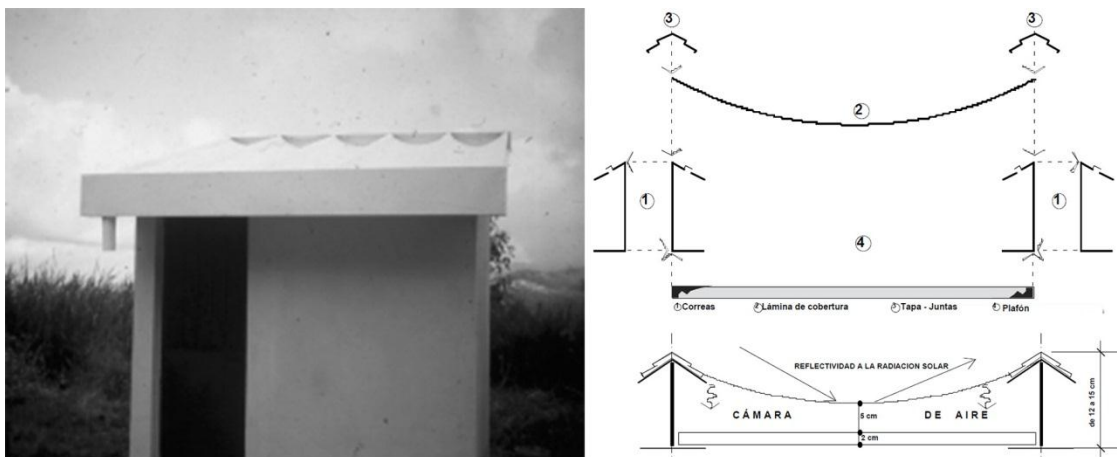


Figura 7. Conformación básica del sistema de techo de lámina metálica SITECH. Fuente: Hernández, 1998.

Escobedo (2013) realizó simulaciones numéricas en el software Design Builder a partir de un modelo con cubierta de lámina metálica acanalada de 1 mm de espesor, con una pendiente del 30% al Sur y una absorptancia solar del 70%, correspondiente a una lámina de aluminio y zinc con pátina de oxidación. Las condiciones climáticas para las simulaciones fueron las del clima cálido húmedo del estado de Tabasco

en México. Como variación al modelo base, a la cubierta se le añadió una hoja adicional de lámina metálica para conformar una cámara ventilada a diferentes alturas y además se realizaron simulaciones con diferentes inclinaciones, reflectancias del acabado superficial de la cubierta y aislamiento interior.

Entre los resultados de este estudio (Figura 8) se presenta que la reducción más importante de temperaturas en la cavidad ventilada se presenta al aumentar la altura de 5 a 10 cm, y a partir de los 15 cm las temperaturas se mantienen casi al mismo nivel. Indica que el mayor sobrecalentamiento se presenta en una cubierta ventilada plana (considera una máxima eficiencia del sistema entre los 15° y 30° de inclinación de la cubierta) y que las temperaturas superficiales tanto de la pantalla exterior, como del techo disminuyen considerablemente a medida que se inclina la cubierta.

Concluye que la velocidad del aire de la cámara no está directamente relacionada a los incrementos de temperatura del aire interior del edificio y que para colores blancos de las pantallas exteriores de las cubiertas ventiladas, los movimientos de aire por flotabilidad térmica disminuyen mucho, siendo esta propiedad reflectiva de la superficie el factor más importante en la prevención del sobrecalentamiento de la cubierta.

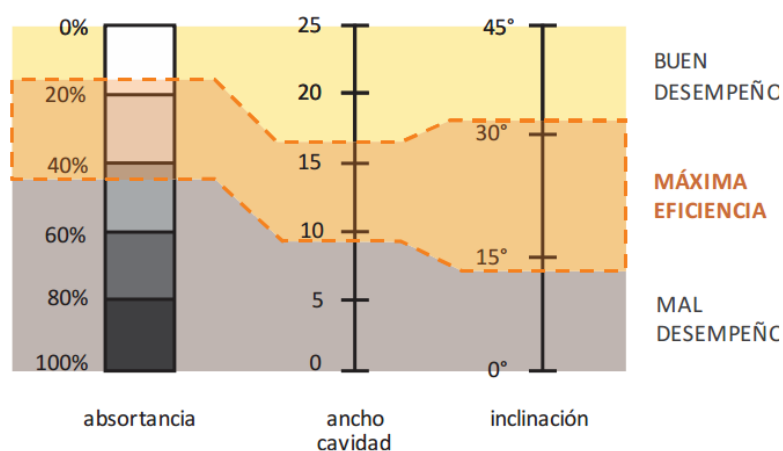


Figura 8. Rangos de eficiencia de las diferentes variables de configuración de cubiertas ventiladas metálicas en la disminución de flujos de calor al interior de los edificios. Fuente: Escobedo, 2013.

Por su parte, Parker (2004) hace un análisis sobre cómo impactan los sistemas de techo en el uso de energía para refrigeración residencial, asegura que el uso de cubiertas metálicas ha incrementado su popularidad y pueden ser comparadas con otros tipos de cubierta más tradicionales.

Las pruebas fueron realizadas durante las condiciones climáticas de verano en Florida, sobre 5 celdas de un ático (Figura 9) con cubiertas de diferentes materiales y tiempo de vida: Galvalume®, tejas de asfalto negro, tejas metálicas color marfil con acabado reflectivo infrarrojo, galvanizado sin acabado y lámina metálica blanca; además una celda de control con cubierta de tejas de asfalto negro y ventilación por cumbrera.

La configuración de cubierta con menor temperatura promedio en el ático fue la construida con doble cubierta ventilada de tejas de asfalto negro, barrera radiante y 6" de espuma aislante en la parte inferior de la cubierta interna, con 2 años de antigüedad y el ático sin ventilación.

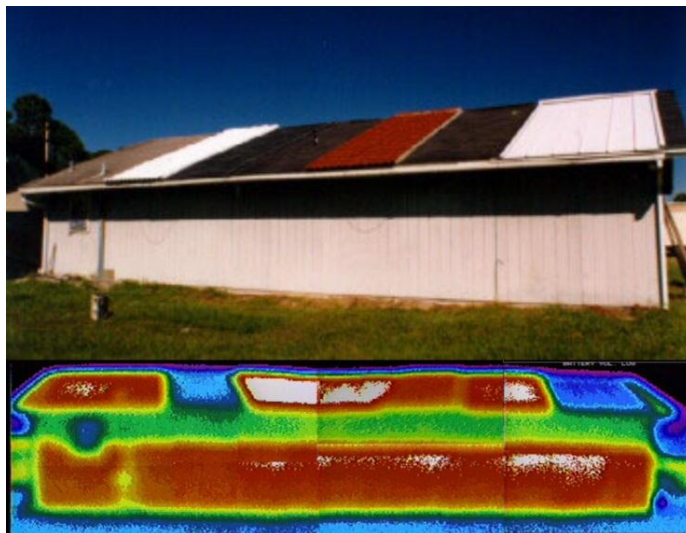


Figura 9. Celdas experimentales de ático con diferentes materiales (arriba) y termografía durante el verano de 2002 (abajo).
Fuente: Parker, D., Sherin, J., & Sonne, J. (2004).

La segunda cubierta con mejor temperatura en el ático fue la cubierta de metal blanco de 7 años edad con el ático ventilado, pero tuvo más bajas ganancias térmicas totales y un menor flujo de calor comparada con la cubierta de tejas de asfalto negro mencionada anteriormente, que tuvo el flujo de calor más alto de todas las estrategias probadas, lo que redujo su eficiencia general. El estudio concluye que la cubierta metálica blanca con una reflectancia solar de 67.6, tuvo un 47% de reducción de las ganancias de calor del techo y el ático, y 15% de ahorro de energía para refrigeración comparada con la celda de control.

Otro estudio representativo es el realizado por Díaz (2012) en el clima cálido húmedo de la República Dominicana, en él examina de manera comparativa el comportamiento térmico de las cubiertas de chapa de acero galvanizado y algunas estrategias de protección térmica complementarias como la cámara ventilada, la cámara no ventilada y la aislación.

Como conclusión enfatiza la necesidad de las estrategias como el uso de sub-cubiertas, cámaras de aire, cielorrasos o aislamientos térmicos para reducir la carga térmica entre el exterior y el interior de las edificaciones. Afirma que la solución de incorporar una cámara de aire ventilada es la más efectiva para evitar que la temperatura superficial del cielorraso se eleve demasiado (Figura 10), y destaca la importancia de mantener coeficientes de absorción bajos en la superficie de las láminas metálicas para contrarrestar la desventaja de la rápida conducción de calor que posee este material.

Indica además que la utilización de materiales aislantes contribuye a reducir el calor que ingresa a la cámara, pero esta medida resulta más costosa que solo ventilar la cámara, si no es posible ventilar la cubierta o solo ventilarla pobremente, las capas aislantes entonces serían una solución casi obligada.

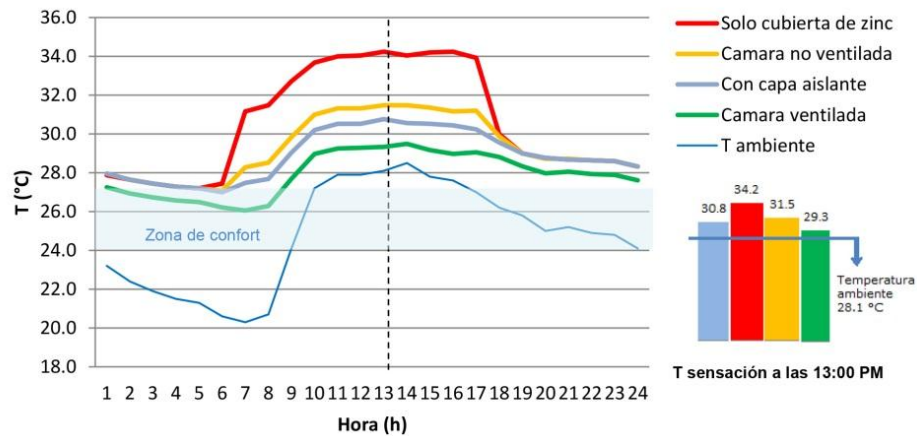


Figura 10. Comparación de temperaturas de sensación en diferentes configuraciones de cubierta metálica. Fuente: Díaz (2012).

Cabe mencionar que entre los aportes de estas investigaciones, resalta la recomendación de utilizar láminas metálicas con un acabado de color claro o blanco para asegurar una baja absorción de radiación solar. Por otra parte también destaca el papel que desempeña el espacio ventilado entre cubiertas para reducir el flujo de calor, ya que el calor irradiado por las láminas metálicas es uno de los grandes problemas de su uso en cubiertas.

En resumen se puede englobar el funcionamiento de la cubierta metálica ventilada en tres principios básicos: protección a la radiación (al contar con dos capas), ventilación (que interviene de en la disminución del flujo de calor al interior) y baja inercia térmica.

Calor, temperatura y equilibrio térmico

Se denomina calor a la energía cinética intercambiada entre un sistema y el medio que le rodea debido a los choques entre las moléculas del sistema y el exterior al mismo. El calor es energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura entre dos sistemas o entre un sistema y su entorno. La cantidad de calor se simboliza con la letra q y su unidad es el joule (J).

La temperatura (T) es una propiedad física de la materia que, cuantitativamente expresa las nociones de calor y frío, los cuerpos que poseen temperatura baja son percibidos como fríos mientras que a grados de temperaturas más altas se los percibe como calientes. La temperatura es un parámetro termodinámico del estado de un sistema, es una medida de la energía cinética. El calor siempre fluye de los cuerpos o sistemas con mayor temperatura hacia los de menor temperatura, ocurriendo la transferencia de calor hasta que se alcanza un equilibrio térmico.

El flujo de calor (Q) es una transferencia de energía que se lleva a cabo como consecuencia de las diferencias de temperatura, se define como el cociente entre la cantidad de calor que atraviesa una superficie por unidad de tiempo, se mide en W/m^2 (Martín, 1996).

El calor específico o capacidad calorífica específica (γ), es una magnitud física definida como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad (grados Kelvin o Celsius), su unidad es el J/kgK .

Conductividad térmica y resistencia térmica

La conductividad térmica de un material (k) es una medida de su capacidad de transferir energía térmica al imponerle un gradiente de temperatura (Lira-Cortés et al, 2008). El coeficiente de conductividad térmica se representa con el símbolo: λ , y en el Sistema Internacional de Unidades es medido en $W/m^{\circ}C$. La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material, su valor puede depender de la temperatura y de una serie de factores tales como la densidad, porosidad, contenido de humedad, diámetro de fibra, tamaño de los poros y tipo de gas que encierre el material.

La resistencia térmica de un material conocido como factor R representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material; en materiales no homogéneos la resistencia es el inverso de la conductancia térmica.

Hay materiales que son buenos conductores de calor como el aluminio, la plata, el cobre y los metales en general, y otros son muy buenos aislantes térmicos como el corcho o el poliestireno expandido.

Transmitancia térmica

La transmitancia térmica (K) simbolizada también como U (valor U, coeficiente global de transferencia de calor), es el cociente entre el flujo de calor en régimen estacionario y el área y la diferencia de temperatura entre los medios circundantes a cada lado del sistema, su unidad es W/m^2K .

La transmitancia térmica es una característica específica de un elemento constructivo, como un muro o un techo, y depende de la conductividad térmica y la geometría de los materiales que lo componen, así como de la radiación térmica y convección en las superficies del elemento. Cuanto mayor sea la transmitancia térmica, menor es el efecto de aislamiento térmico del elemento. Cuanto menor sea el valor U, mejor es la aislación térmica y menor es la pérdida de calor a través del elemento. La inversa del coeficiente global de transferencia de calor es la resistencia térmica (R).

Mecanismos de transferencia de calor

Cuando dos cuerpos que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto entre sí, se produce una transferencia de calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. La transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos físicos: conducción, convección y radiación.

Por lo general la transferencia de calor por conducción se produce a través de cuerpos sólidos, aunque también es posible en líquidos y gases estacionarios. La velocidad a la que viaja el flujo a partir de que la primera partícula del material en contacto con la radiación recibe el calor depende de la capacidad térmica del material, conocida como conductividad, y la densidad y el contenido de humedad en el material.

La convección es un fenómeno de transporte (materia y energía) que tiene su origen en diferencias de densidad, cuando un fluido se calienta, se expande y en consecuencia su densidad disminuye. Si una capa de material más fría y más densa se encuentra encima del material caliente, entonces el material caliente asciende a través del material frío hasta la superficie. El material ascendente disipará su energía en el entorno, se enfriará y su densidad aumentará, con lo cual se hundirá reiniciando el proceso.

La radiación es la transferencia de calor entre una superficie y su entorno mediante la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas, como la luz visible, la radiación infrarroja (onda larga), la radiación ultravioleta y los rayos X. Esta transferencia se produce entre medios a diferente temperatura aunque estén separados por el vacío. La interacción de la radiación electromagnética con los materiales en general depende tanto de su magnitud y sus características cualitativas, como de la naturaleza de los materiales.

La radiación suele estar en ambientes con diferentes longitudes de onda, que dependen del tipo y temperatura de la fuente y pueden producir distintos efectos según sea su espectro. Se clasifica en

radiaciones de onda larga y corta, el espectro de las radiaciones térmicas contiene longitudes de onda entre los 0.2 y 50 micrómetros (μm), la radiación térmica de onda corta (característica de las fuentes de radiación de alta temperatura, como el Sol) tiene longitudes entre 0.2 y 3 μm , incluye la radiación ultravioleta, todo el espectro visible y la radiación infrarroja, las cuales pueden ser absorbidas por los objetos que nos rodean.

La radiación térmica de onda larga, o irradiación, tiene longitudes entre los 3 y 50 μm y es característica de las fuentes de radiación a temperatura ambiente como son las superficies del entorno, cuyo espectro comprende el infrarrojo lejano.

La radiación absorbida se distribuye entre el calentamiento del material que está detrás de la superficie por conducción o acumulación, se disipa en el aire en contacto con la superficie por convección o se reenvía al exterior como irradiación infrarroja.

El concepto de absorción se asocia a la energía radiante de onda corta como la radiación solar o la luz, motivo por el cual se tiende a usar en coeficiente de absorción (α) de las superficies a dichas longitudes de onda.

Absortancia, emitancia y reflectancia

Coeficiente de absorción o absortancia (α) es la fracción de la radiación incidente absorbida por la superficie, mientras que el resto puede ser reflejada o incluso transmitida si la superficie es parcialmente transparente. La absorción de radiación es un fenómeno superficial y no un fenómeno de volumen, de forma que el interior del sólido carece de interés en la absorción de radiación, sin embargo, el calor generado en la absorción puede fluir hacia el interior del sólido por conducción.

Se absorbe sólo una parte de la radiación, dependiendo del color de la superficie receptora. La absorción es baja para colores claros, una superficie blanca refleja bien las ondas visibles cortas y absorbe las radiaciones de onda larga, o sea refleja la radiación solar y absorbe las radiaciones emitidas por los cuerpos en el ambiente. La mayoría de los cuerpos no metálicos tiene un coeficiente de absorción alto. Las superficies metálicas son malas absorbentes (Barcelo, s.f.).

Emitancia (ϵ) es la propiedad que tiene la superficie de los materiales de emitir energía radiante. Todos los materiales tienen emisividades que van de grado cero a uno. Entre más bajo el grado de emisividad de un material, menor es el calor irradiado de esa superficie (energía radiante infrarroja). Desde un punto de vista práctico, la emisividad es qué tan reflexiva o “infrarrojamente brillante” es una superficie (Stuart, 2016).

Reflectancia (ρ) se refiere a la fracción de energía incidente que se refleja de una superficie que está siendo afectada por la radiación. La reflectancia y la emisividad son complementarias, una emisividad

baja es indicadora de una superficie altamente reflectante (Asociación Internacional de Fabricantes de Aislante Reflectante, 2002).

Retardo térmico e inercia térmica

Se llama retardo térmico al desfase en el tiempo de la transmisión de una onda de calor a través de un elemento constructivo sujeto a un régimen periódico (también llamado variable) de flujo de calor debido a la inercia térmica del elemento.

La inercia térmica es la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura, ésta tiene una vinculación directa con la acumulación de energía, la capacidad de almacenar energía de un material depende de su masa, su densidad y su calor específico. De manera sencilla, es la capacidad que tiene la masa de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente, permite la amortiguación en la variación de las temperaturas y el desfase de la temperatura interior respecto a la exterior.

Soluciones de diseño de cubiertas adoptadas en respuesta al clima cálido húmedo

El concepto de funcionamiento pasivo de los edificios, implica el uso de procesos naturales para calefacción o enfriamiento para conseguir un balance en las condiciones ambientales interiores. El flujo de energía en el diseño pasivo se da por medios naturales: radiación, convección o conducción, sin utilizar ningún aparato eléctrico (Kamal, 2012).

La arquitectura tradicional de los trópicos se caracteriza por poseer un diseño sensible al clima, los pueblos que han habitado las zonas tropicales a lo largo de la historia se han adaptado a vivir con las características de estos climas, esto se manifiesta a través del uso de técnicas de protección solar y sistemas pasivos de climatización para proveer confort ambiental, el calor excesivo es la principal causa del discomfort térmico, lo que hace del enfriamiento el requerimiento básico de los ocupantes de las edificaciones.

En los climas cálidos donde las temperaturas son altas, con reducidas variaciones entre día y noche y entre estaciones, no se obtiene ventaja alguna de la inercia térmica de los edificios (Serra & Coch, 1995). La radiación es siempre intensa por lo que resulta importante tener el máximo de protección posible, no sólo hay que preocuparse de detener la radiación solar directa, sino también la difusa, además la humedad relativa constantemente alta hace muy importante la ventilación, que más allá de reducir la humedad también disipa el calor.

En general el diseño arquitectónico para regiones de climas cálidos debe considerar muy especialmente una cuidadosa respuesta de los siguientes aspectos (Givoni, 2000, citado por Guerra, 2003, p. 198).

- La forma urbana y del edificio.
- La orientación de las habitaciones principales y de las ventanas.
- Los dispositivos de oscurecimiento para las ventanas.
- El color de la envolvente del edificio.

Las arquitecturas tradicionales y neotradicionales, producto de un largo proceso histórico de prueba y error, se presentan como una auténtica expresión de la cultura popular (Ramos, 2011), persisten hasta hoy tipologías estructurales, formales y funcionales que dan cuenta de significativas adaptaciones al sitio, a los modos particulares de habitar y al clima.

Generalmente, los edificios de la arquitectura vernácula de las zonas con climas cálido-húmedos tienen grandes aberturas, formas estrechas y alargadas en el eje este-oeste y una implantación independiente, es decir, alejados entre sí para permitir el paso libre del aire sin crear barreras. Las paredes internas pueden desaparecer (planta libre) o tener aberturas totales de los paramentos para permitir la ventilación.

Es notable el uso de persianas y celosías que proporcionan protección ante la radiación y permiten la libre circulación del aire, y en algunos casos son utilizadas como elementos constructivos, en lugar de los muros. Estos elementos también sirven para reducir la cantidad de luz que penetra por las ventanas y, por lo tanto, también la cantidad de calor. Por otra parte, los pisos elevados permiten obtener una mejor exposición a las brisas, protegerse de las inundaciones y los insectos.

La cubierta es el elemento de mayor importancia, ya que tiene la función de proteger tanto de la radiación solar como de la lluvia, se diseñan con la inclinación suficiente para evacuar el agua de las abundantes precipitaciones y con grandes voladizos, que muchas veces se convierten en pórticos y galerías abiertas, que sirven de protección solar y zonas de descanso. En el próximo apartado se describen los sistemas pasivos de enfriamiento comúnmente utilizados en las cubiertas en climas cálido-húmedos.

Sistemas pasivos de enfriamiento en cubiertas

El techo es probablemente el elemento arquitectónico que más caracteriza la arquitectura tropical (Stagno, 2004), esto se debe a que este elemento por sí solo resuelve con su diseño los problemas que plantean la lluvia y el Sol, es decir la necesidad de protección y cobijo.

De acuerdo con Olgyay (1968), Givoni (1969), Bardou y Arzoumanian (1981) y González (1986), citados por Fajardo (2005), la cubierta tiene especial importancia para el comportamiento climático del interior de la edificación, debido a que la mayor aportación de energía térmica que recibe el espacio construido es principalmente resultado del flujo de energía que pasa a través de la cubierta por tres factores: posición respecto al Sol, materiales de construcción y la intensidad de radiación.

El término “pasivo” se aplica generalmente a los sistemas de climatización que no dependen de combustibles fósiles ni electricidad⁵, y que están incorporados en la construcción y organización del edificio (jerarquía de distribución espacial en respuesta a la tendencia del flujo de energía), de tal manera que la energía del ambiente exterior, se puede captar, aprovechar, bloquear, transferir, almacenar o descargar en forma natural, de acuerdo con el proceso de climatización que se requiera (Fajardo, 2005).

Existen diversas alternativas para climatizar de forma pasiva en climas cálidos, en el caso del enfriamiento de cubiertas, algunas estrategias consisten en el aprovechamiento de las propiedades termofísicas y radiativas de los materiales constructivos, o en el uso de superficies selectivas en las cubiertas mediante la aplicación de recubrimientos de color claro o elementos reflejantes de la radiación solar directa. Otra de las soluciones es el sombreado de la techumbre dejando, entre ésta y una segunda cubierta protectora, cámaras de aire que pueden o no estar ventiladas.

⁵ Existen también sistemas activos de control climático que funcionan con energías renovables (como calefactores y unidades de tratamiento y difusión de aire).

En los siguientes apartados se describen y ejemplifican algunos de los sistemas pasivos de enfriamiento en cubiertas más utilizados.

Sombreado del techo

El sombreado del techo es un método efectivo para reducir las ganancias de calor, este método consiste en colocar una cubierta protectora sobre el techo de una edificación con el fin de evitar o disminuir el efecto de la radiación solar directa sobre éste, disminuyendo así las ganancias de calor hacia el interior de las edificaciones.

Los techos pueden sombreadarse mediante cubiertas hechas de concreto, con plantas, lonas, vasijas de barro, o láminas metálicas. Dependiendo de los materiales y sistemas constructivos. Dichas cubiertas pueden ser fijas o móviles, ya que es importante no interferir con el enfriamiento nocturno.

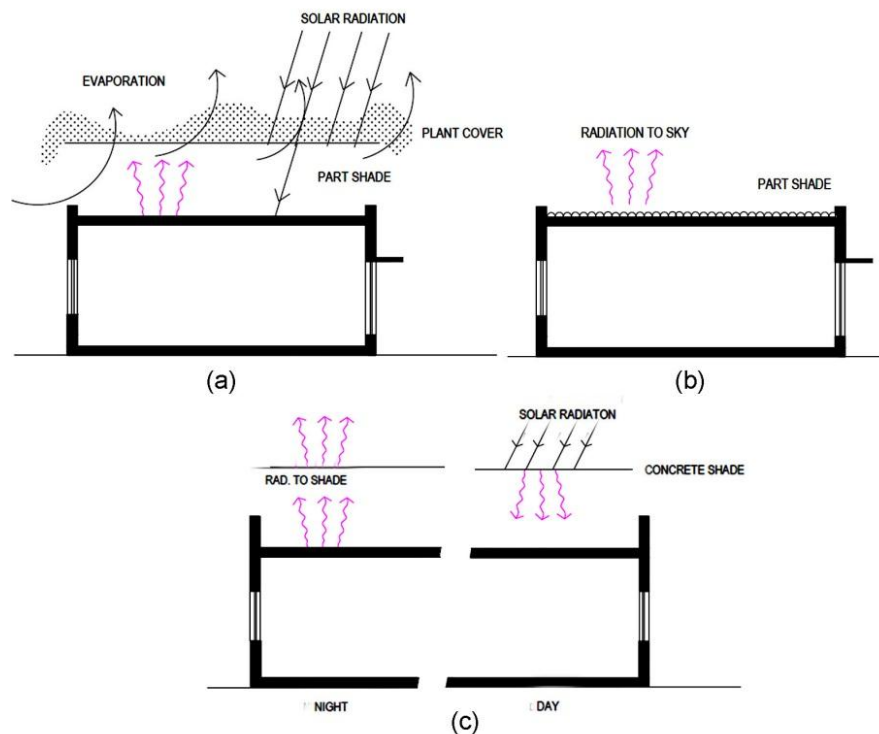


Figura 11. Ejemplos de techos sombreados con cubierta vegetal (a), vasijas de barro (b) y cubierta sólida (c). Fuente: Kamal, 2012.

Enfriamiento evaporativo indirecto

El enfriamiento evaporativo es un proceso que utiliza el efecto de la evaporación del agua como pozo térmico, el agua requiere de suministro de calor para evaporarse, lo que provoca un enfriamiento tanto del aire como del agua. En climas cálidos húmedos se recomiendan los sistemas de enfriamiento

evaporativo indirecto, con los que se reduce la temperatura de bulbo seco sin aumentar el contenido de humedad del aire.

Este tipo de enfriamiento funciona en los techos al evaporar el agua de la superficie a través del aire no saturado, lo que extrae parte del calor latente requerido, reduciendo así la temperatura del techo y por lo tanto las ganancias de calor. Al disminuir la temperatura del techo, también disminuye la temperatura interior sin elevar el nivel de humedad, la radiación solar que incide sobre la película de agua es utilizada en la evaporación del agua y por lo tanto le impide entrar en el espacio habitable.

Además, la evaporación también enfría el aire sobre el techo, el cual se desliza hacia abajo y entra en la edificación a través de la infiltración y la ventilación, lo que le proporciona un enfriamiento adicional (Kamal, 2015).

La Figura 11(a) ilustra las características básicas del enfriamiento por techo-estanque, en donde un techo sin aislar sombrea el estanque durante el día y permite que el aire circule sobre el estanque y remueva el vapor de agua.

Otra alternativa se muestra en la Figura 11(b) en la que el estanque tiene un aislante flotante, durante la noche se rocía agua sobre el aislante que se enfría mediante evaporación y radiación, durante el día el agua permanece bajo el aislante protegida de la radiación solar, y actúa junto con la estructura del techo como un disipador de calor.

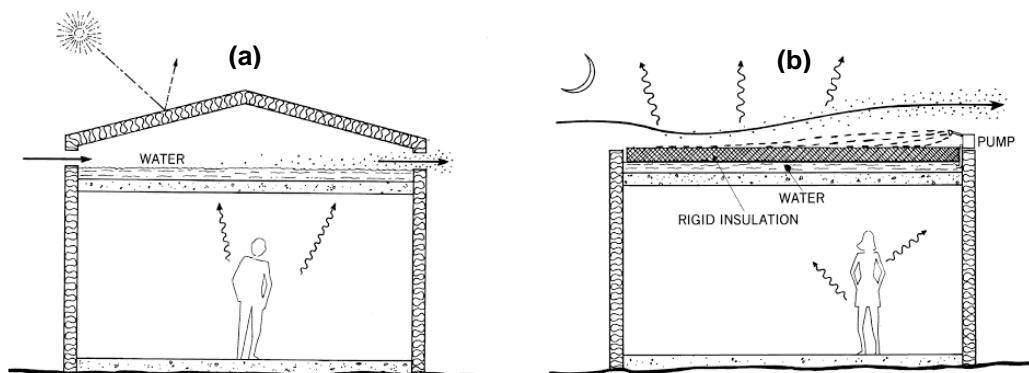


Figura 12. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto. (a) Techo estanque sombreado, (b) rocío de agua y aislamiento flotante. Fuente: Lechner (2014).

Otros ejemplos más sencillos de enfriamiento evaporativo son la construcción la colocación de almohadillas húmedas o materiales retentivos de agua, rociando los techos periódicamente. La eficacia de las técnicas de enfriamiento evaporativo depende de la temperatura del aire ambiente y la humedad, la intensidad de la radiación solar, la humedad de la superficie del techo y el tipo de tejado (Kamal, 2015).

Enfriamiento radiativo

Todos los cuerpos con temperatura superior a los 0°K emiten radiación electromagnética con espectros de diferentes longitudes de onda en función de su temperatura, los cuerpos expuestos a la atmósfera pierden calor por emisión de radiación de onda larga, este fenómeno se conoce como enfriamiento radiativo.

Este tipo de enfriamiento se basa en el hecho de que el calor siempre fluye de las superficies calientes a las frías, en general los métodos de enfriamiento radiativo consisten en absorber el calor de las superficies calientes dentro de un edificio y transferirlas a superficies más frescas expuestas al ambiente. El techo es el componente de la edificación que mejor se desempeña como superficie radiadora en climas cálidos.

Un ejemplo es el sistema de techo-estanque como el que se muestra en la Figura 13, en el que se coloca un estanque poco profundo sobre la superficie de un techo plano de material altamente conductivo y sobre éstos un aislante térmico móvil. El estanque permanece cubierto durante el día para evitar que se caliente el agua, y durante la noche se quita el aislamiento para el agua se enfríe. De esta forma el techo se convierte en un elemento que enfría el espacio debajo de él por convección y radiación sin aumentar la humedad interior.

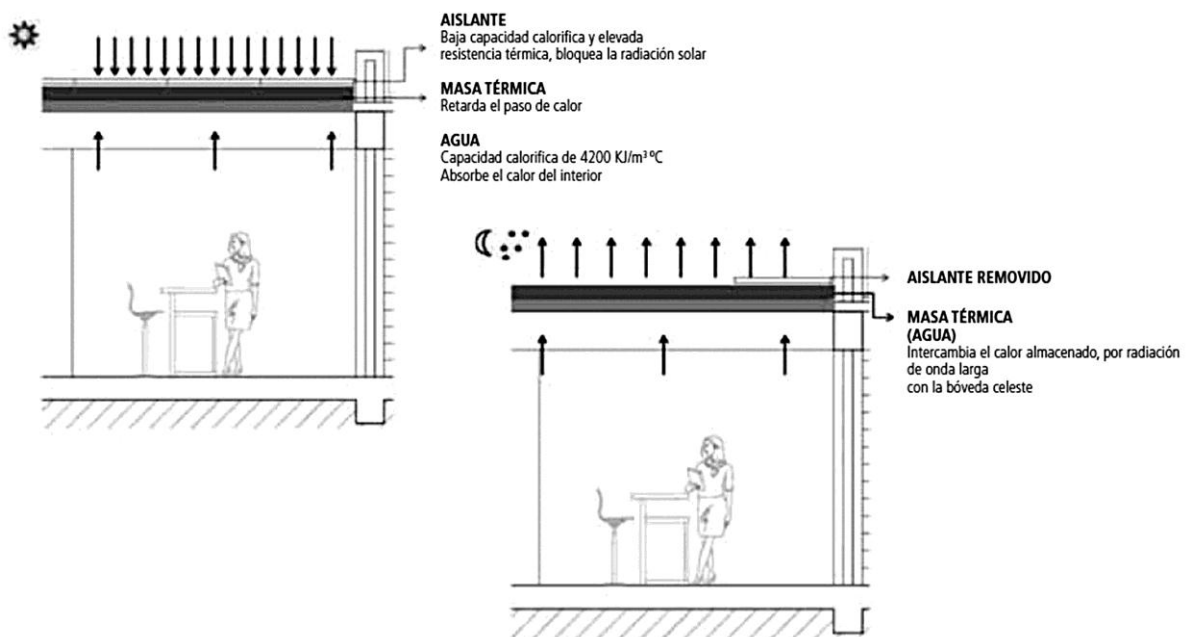


Figura 13. Funcionamiento diurno y nocturno del sistema de techo-estanque. Fuente: Piñate et al, 2014.

Otro ejemplo de enfriamiento radiativo son los techos metálicos con aislante removible, como el que se muestra en la Figura 14, durante el día el aislante está en posición cerrada para mantener el calor afuera

y por la noche el aislante se mueve a posición abierta y así el calor al interior del espacio interno puede ser irradiado hacia afuera.

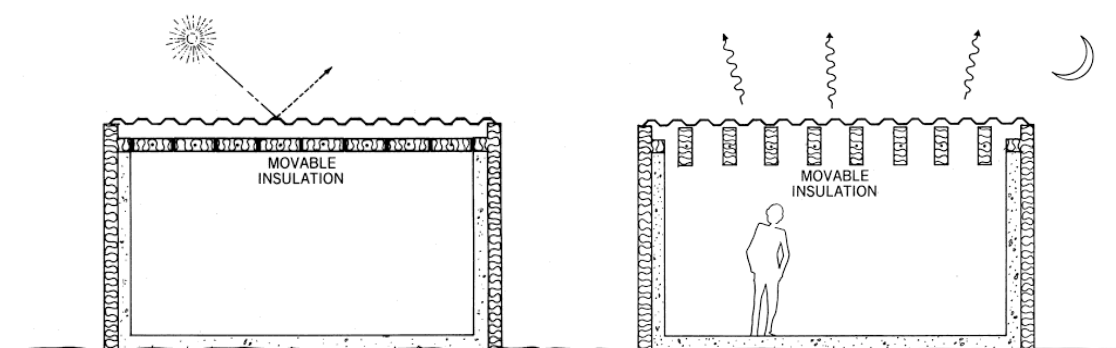


Figura 14. Cubierta metálica con aislante móvil. Fuente: Lechner (2014).

De acuerdo con Lechner (2014), el enfriamiento radiativo no es eficiente en regiones con mucha nubosidad, se obtiene mejor desempeño en lugares con cielos despejados y poca humedad; aunque también funciona en regiones templadas pero con menor eficiencia. A menos que el radiador también se use para calefacción pasiva, se recomienda pintar la superficie externa de color blanco, y debido a que el efecto de enfriamiento es bajo es necesario usar toda la superficie del techo.

Superficies reflectantes

La reflectancia solar, también conocida como albedo, es una característica de los materiales que se refiere a la reflexión de la energía solar después de que entra en contacto con la superficie del material. El concepto de la cubierta reflectante trabaja con las propiedades de las superficies como reflectores de la radiación electromagnética invisible (onda corta y onda larga) y como un buen emisor de calor (radiación infrarroja), a diferencia de los techos calientes o de color oscuro, que absorben grandes cantidades de energía solar (Urban & Roth, 2010, citados por Al-Obaidi, 2014).

La Tabla 1 registra los valores de reflectancia, emitancia y el índice de reflectancia solar o SRI⁶ por sus siglas en inglés, de algunos de los materiales comúnmente utilizados en los techos, los materiales con valores de SRI altos son los más adecuados para mantener frescas las superficies de los techos.

Las propiedades físicas superficiales de los materiales son los factores que más influyen en el comportamiento térmico del techo, particularmente en si es fresco o no. Los materiales con superficie reflectante pueden ser desde ladrillos cerámicos o de barro, hasta láminas metálicas, membranas bituminosas modificadas, espuma de poliuretano espolvoreada, tejas de fibra de vidrio o arcilla, o pinturas y pigmentos especiales.

⁶ Este índice utiliza los factores de reflectancia y emitancia para generar una calificación entre 0 y 100, mientras más alto el SRI más fresca es la superficie.

Materiales genéricos para techo	Reflectancia solar	Emitancia infrarroja	Índice de Reflectancia Solar (SRI)
EPDM* Gris	0.23	0.87	21
Teja de asfalto gris	0.22	0.91	22
Teja de cemento sin pintar	0.25	0.9	25
Superficie granular bituminosa blanca	0.26	0.92	28
Teja de arcilla roja	0.33	0.9	36
Grava ligera en azotea	0.34	0.9	37
Aluminio	0.61	0.25	56
Grava en azotea con recubrimiento blanco	0.65	0.9	79
Techo de metal con recubrimiento blanco	0.67	0.85	82
EPDM* Blanco	0.69	0.87	84
Teja de cemento blanca	0.73	0.9	90
Recubrimiento blanco - 1 capa, 0.25 mm	0.8	0.91	100
PVC blanco	0.83	0.92	104
Recubrimiento blanco - 2 capas, 0.5 mm	0.85	0.91	107

*Caucho (Etileno Propileno Dieno tipo M)

Tabla 1. Índice de Reflectancia Solar (SRI) de materiales típicos para techos. Fuente: adaptado de Lawrence Berkeley National Laboratory Cool Roofing Materials Database, 2000.

Las superficies en colores claros pueden reflejar hasta el 80% de la radiación solar incidente, una superficie reflectante oscura refleja el 40%, y una superficie normal de color oscuro sólo el 20% (Al-Obaidi, 2014). La Figura 15 ilustra la diferencia entre la cantidad de radiación recibida, reflejada y transferida por una cubierta negra y una blanca bajo las mismas condiciones, ocasionada por el efecto del albedo.

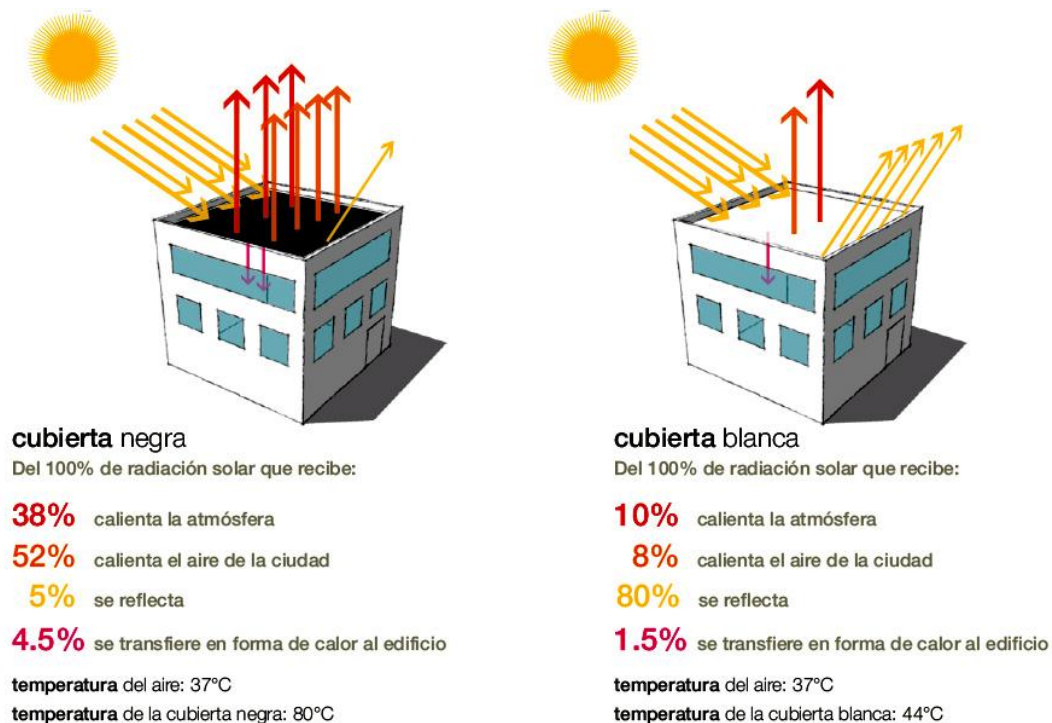


Figura 15. Efecto albedo. Fuente: Campos, 2012.

Definición y características constructivas de los sistemas de doble cubierta ventilada

En términos generales un sistema de doble cubierta ventilada consiste en proporcionar una segunda cubierta por encima del techo de una edificación dejando un espacio vacío entre ellos, ésta cubierta secundaria (blindaje externo) contribuye a disminuir las ganancias térmicas al formar un escudo contra la radiación solar y proporcionar sombra al techo principal, por su parte el espacio de aire propicia el desalojo del exceso de calor y humedad mediante la ventilación antes de que puedan ser transmitidos al interior de la edificación.

Existen diferentes configuraciones y características constructivas de los sistemas de doble cubierta ventilada, en la Figura 16 se ejemplifican tres tipos: en primer lugar está el ático ventilado, ya sea por medio de aberturas o extractores; seguido de la cubierta inclinada con ventilación entre capas, donde el aire penetra desde el sofito⁷ y circula para salir por la cumbrera; y por último el techo plano, protegido con una cubierta secundaria elevada en los extremos para permitir la ventilación cruzada. Estos ejemplos emplean los mismos principios funcionales y poseen por igual tres componentes: el blindaje externo o cubierta secundaria, el espacio ventilado, y el techo principal.

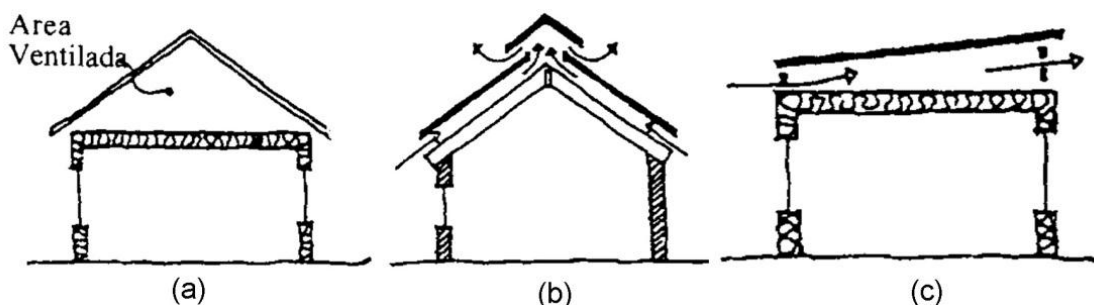


Figura 16. Ejemplos de cubiertas ventiladas. Ático ventilado (a), cubierta inclinada con ventilación sofito-cumbrera (b) y techo plano con cubierta secundaria y ventilación cruzada (c). Fuente: Stulz & Mukerji, 1993.

La Figura 17 muestra un esquema que detalla los componentes principales de la doble cubierta ventilada así como los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en el sistema, desde el blindaje externo hacia el espacio interior.

La superficie externa (surface A) del blindaje (shielding) es receptora de la radiación solar y atmosférica, una parte de ésta es reflejada hacia la atmósfera y otra se transmite por conducción hacia la superficie inferior del blindaje (surface B). A continuación el blindaje irradia el calor que recibe hacia la superficie externa del techo principal (surface C) y parte de éste calor se transmite al aire y es disipado mediante convección. Por último el calor se transmite por conducción de la superficie externa a la superficie interna del techo principal (surface D), posteriormente hacia el espacio interior por convección.

⁷ Plano inferior del saliente de una cornisa o de otro cuerpo voladizo

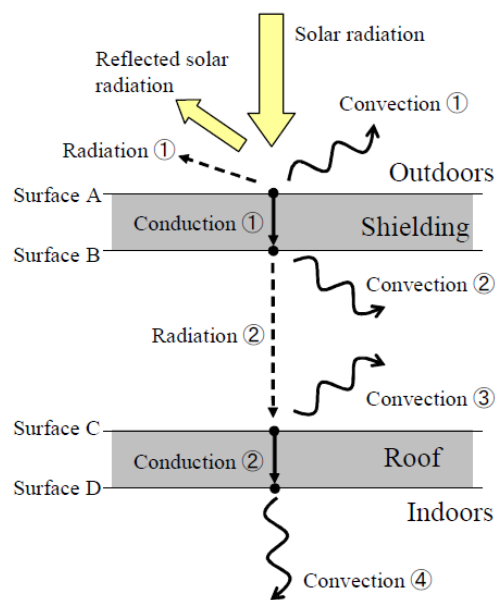


Figura 17. Mecanismos de transferencia de calor en la doble cubierta. Fuente: Shiraishi et al, 2004.

El blindaje o cubierta secundaria

Los materiales comúnmente utilizados en cubiertas en los climas cálidos son las tejas de concreto, terracota, arcilla o cerámica, y láminas metálicas o de fibrocemento. Sin embargo, el material del blindaje de la doble cubierta ventilada debe cumplir con ciertas características que lo hacen adecuado para que su desempeño térmico sea conveniente, como son los coeficientes de absorción⁸ (α) y transferencia de calor (K) bajos.

Otras propiedades deseables son la baja capacidad térmica, para evitar que el calor se acumule, y los altos valores de reflectancia para reflejar hacia la atmósfera tanta radiación solar como sea posible.

Además de las propiedades termo-físicas, existen otros requerimientos primarios para los materiales del blindaje, tanto para las estructuras de soporte como para la propia cubierta, estos son: la resistencia a la penetración de la lluvia y a las fluctuaciones de la humedad y la temperatura; la resistencia al desgaste causado por los hongos, insectos y la radiación solar; y la resistencia a los impactos y vientos fuertes, además de no contener materiales tóxicos, especialmente si se recolecta agua de lluvia.

El espacio ventilado

Siempre que pueda removerse constantemente, el aire es un buen disipador de calor, y en los sistemas de doble cubierta ventilada contribuye a mantener las temperaturas interiores de los edificios cercanas o iguales a las exteriores por eliminar el excedente de flujo de calor que es irradiado desde el techo.

⁸ Cociente entre el flujo radiante o luminoso absorbido por un cuerpo y el flujo incidente sobre él. La absorción de un cuerpo negro es por definición igual a 1.

En el espacio ventilado el aire se mueve desde el fondo hacia la parte superior del techo bajo el efecto de flotabilidad debido a la diferencia de temperaturas, removiendo así el calor acumulado proveniente de las ganancias térmicas solares, por lo tanto, la ganancia de calor en el ambiente interior a través del techo principal podría reducirse, sobre todo en verano (Zhang, 2016).

Según la conformación de la cámara de aire en la cubierta ventilada, se pueden considerar tres tipos de ventilación (Figura 18): la microventilación (circulación de aire entre el elemento de soporte y la hoja externa, con espesor de cavidad restringido de 3 a 4 cms), ventilación bajo revestimiento (capa de aire entre hojas interna y externa que permite un flujo continuo), y ventilación bajo techo (cámara de aire amplia e irregular, comprendida bajo las pendientes de la cubierta y el forjado horizontal inferior) (Escobar, 2013).

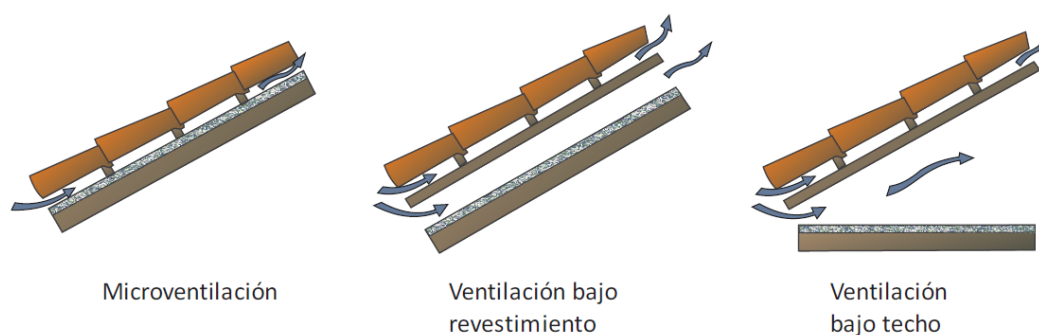


Figura 18. Tipos de ventilación en cubiertas. Fuente: Escobar, 2013.

La ventilación interna tanto en techos como en paredes es capaz de remover el calor y la humedad de manera efectiva hacia el medio ambiente y mantener la parte interna del techo fresca y seca (Balocco, 2002).

De acuerdo con Díaz (2012), en las cámaras no ventiladas el aire estanco actúa como aislante, pero en climas cálidos no son tan efectivas como las cámaras ventiladas, ya que cuando sobrepasan ciertas dimensiones aumenta el intercambio de calor a causa de los procesos convectivos y radiativos, contribuyendo a la propagación del calor por todas las superficies y aumentando las temperaturas gradualmente al no poder ser expulsado fuera de la cámara.

Protección térmica complementaria

Barreras radiantes

Una barrera radiante es una superficie reflectante de baja emisividad colocada en un componente de la construcción que intercepta el flujo de energía radiante. Las técnicas de barreras radiantes eliminan en un 95% la ganancia de calor radiante del Sol, por lo cual reduce la asimilación de calor del componente constructivo (Sosa & Siem, 2004).

En general las barreras radiantes son paneles o membranas flexibles compuestas por dos delgadas hojas metálicas adheridas a un material de refuerzo que puede ser láminas de polietileno, polietileno con burbujas de aire, textil sintético, fibra de vidrio o papel kraft. Aunque las barreras radiantes reducen las pérdidas y ganancias de calor, no son un material aislante en sí mismo y no poseen valor R inherente.

El aluminio pulido es uno de los materiales con más bajo índice de emisividad (0.040)⁹, razón por la que es comúnmente usado en aislamientos reflectivos y barreras radiantes.

Comúnmente las barreras radiantes se utilizan en los áticos o cielorrasos, y pueden ser usadas dentro de las cámaras de aire para reducir la transmisión de calor por radiación aplicándolas sobre una o ambas caras internas de la cámara, pero su viabilidad debe ser evaluada técnica y económicamente ya que en ciertas condiciones los resultados pueden ser poco duraderos por la oxidación de la capa metálica en presencia de la humedad del aire y la deposición de polvo dentro de una cámara intransitable, factores que contribuyen a la pérdida de efectividad.

Aislantes

Cuando se utilizan materiales aislantes en el techo se pueden reducir sustancialmente las ganancias de calor a través de estos componentes (Díaz, 2012). El mejor desempeño del aislante en las dobles cubiertas se obtiene colocando el aislante térmico debajo de la capa de aire, es decir; sobre el techo principal. Una posible solución para aumentar el rendimiento de la cubierta ventilada es distribuir el aislamiento térmico tanto sobre como debajo de la capa de aire ventilada (Gagliano et al, 2012).

Además de las propiedades aislantes también es importante que el material no sea higroscópico, es decir, que no absorba humedad, lo cual disminuiría su efectividad con el paso del tiempo.

El aprovechamiento de la alta resistencia térmica de los materiales aislantes en los climas cálidos es tema de discusión entre los investigadores, Barrios *et al* (2010) sostienen que la resistencia térmica no es un buen criterio para seleccionar la configuración del techo o muro de una edificación sin aire acondicionado. Por su parte los resultados de las investigaciones de Huelsz *et al* (2009) muestran que cuando la variación de temperatura diaria es importante, un valor alto de la resistencia térmica no asegura un buen desempeño térmico. Es necesario también que la envolvente tenga una alta capacidad de almacenamiento térmico.

⁹ Fuente: Fernández, P. (2015).

La doble cubierta ventilada en la arquitectura vernácula tropical

En la vivienda tradicional de las zonas tropicales, la cubierta es un elemento muy importante, ya que debe tener la doble función de sombrilla y paraguas; en ciertas regiones llega a descomponerse en varias cubiertas superpuestas que se producen sombras entre sí y permiten el paso del aire. Las cubiertas típicas de estas zonas generalmente tienen grandes inclinaciones, lo que permite evacuar las frecuentes lluvias, y poseen aberturas entre sus diferentes planos para permitir la entrada y salida del aire. Son cubiertas con poco peso, para evitar el almacenamiento del calor de la radiación, y que propician una cierta "respiración" para evitar condensaciones y el mismo calentamiento del aire (Serra & Coch, 1995).

Una de las soluciones constructivas más eficientes para este tipo de climas es la doble cubierta ventilada, este es un sistema que resulta muy conveniente pues reduce la carga de calor durante el día y permite el enfriamiento por la noche. Un ejemplo notable de dicho sistema está en las casas tradicionales del pueblo Cham (Figura 19), perteneciente al grupo de etnias malayo-polinesias en Vietnam central, cuyo sistema constructivo de cubierta es uno de los casos más singulares de aislamiento frente a la radiación infrarroja.



Figura 19. Vivienda tradicional de la etnia Cham, Vietnam. Fuente: Lake, 2010.

La cubierta superior (agâk ralang) de paja o como en este caso, de teja cerámica plana sobre rastreles, se eleva 0.5 metros sobre otra cubierta de barro y paja con su perímetro completamente abierto. Bajo una intensa radiación solar, ésta cubierta cerámica actúa a su vez como un cuerpo radiante enviando calor en dirección perpendicular a su superficie, la capa de barro de 0.1 metros de espesor crea un efecto pantalla y el aire que circula entre ambas cubiertas evita su sobrecalentamiento. (Palomar et al., 2014)

Otro ejemplo de cubierta ventilada es la utilizada en las casas malayas tradicionales (Figura 20), cuyos techos altos, típicos en la arquitectura vernácula tropical, muestran un buen entendimiento del efecto stack: el aire caliente asciende con fuerza y sale a través de las juntas de ventilación o, en el caso de los techos con forma de embudo, a través de rejillas al final de cada hastial. Los materiales de baja

capacidad térmica son parte de la herencia de estas construcciones, el material más común para las cubiertas es la paja hecha de hojas de palmera nativas (Lokman, 2007).



Figura 20. Aberturas de ventilación en el techo de la casa tradicional malaya. Fuente: Center of Built in the Malay World, 1986.

Las cubiertas dobles implementadas en el pueblo Masa en Camerún y en Orisa, India (Figura 21), se construyen con paja y arcilla. La capa de paja, renovada cada año, protege del agua en la estación de lluvias a la de arcilla y la protege también del Sol directo, evitando el almacenamiento de calor y que se caliente el interior por radiación re-emitida. El espacio vacío entre las dos capas ofrece aislamiento adicional en días calurosos y la capa de fango regula con su inercia la repercusión interior de las oscilaciones térmicas exteriores. Por último, la inercia térmica mejora al quedar la capa de paja como aislamiento exterior, teóricamente más favorable para la inercia del edificio. (Serra & Coch, 1995)



Figura 21. Cubiertas dobles en el pueblo Masa (Camerún) y Orisa (India). Fuente: Serra & Coch, 1995.

Cubiertas metálicas en la vivienda tropical

El galvanizado con zinc para proteger el acero de la corrosión fue desarrollado en Francia en 1837, hacia la década de 1850 ya se utilizaba este material en la construcción de oficinas de correos y aduanas, así como en los cobertizos de trenes y fábricas. Muchas formas nuevas y útiles de revestimientos para el acero galvanizado y los techos metálicos fueron puestos en el mercado en los cincuenta años posteriores a 1870 (Hall, 1988), cuando comenzaron a desarrollarse las tejas metálicas.

Los techos metálicos en América son un fenómeno principalmente del siglo XIX (Sweetser, 1987), anteriormente los únicos metales utilizados comúnmente eran el plomo y el cobre, que se usaban para cubrir las superficies del tejado donde la madera, baldosas o tejas no eran apropiados a causa de la forma o pendiente del techo.

Para principios del siglo XX las chapas de metal ya eran populares como material de cubiertas en el viejo continente. Paralelamente las colonias europeas establecidas en el archipiélago de las Antillas requerían de viviendas adecuadas para los administradores de sus territorios coloniales, así que adaptaron o importaron, tal cual, sus conocimientos constructivos a la franja "cálida" del planeta. Aparece de esta manera el estilo anglo-antillano y con ello las cubiertas de chapas de zinc como una de sus características más distintivas (Díaz, 2012).

Las cubiertas de las construcciones de este estilo antillano tienen claras influencias inglesas verificables en la adaptación constructiva del estilo *bungalow*¹⁰, referente casas pequeñas de una sola planta hechas de madera características de Bengala, primera provincia británica en la India. Ejemplo de este influjo inglés es la arquitectura de la vivienda popular dominicana (Figura 22).



Figura 22. Vivienda popular en República Dominicana. Fuente: Durán & Brea, 2009.

¹⁰ Término anglo-hindú, fruto de "banglā", palabra hindi que significa "de Bengala". (Real Academia Española, 2014)

Por lo general en estas viviendas las cubiertas se construyen a dos aguas o pendientes, formando triángulos o tímpanos en los lados opuestos a las pendientes, cuya modalidad adquiere el nombre de “cubierta de gablete”. La otra forma de cubierta predominante es a cuatro aguas que se forma cuando los tímpanos se inclinan formando limatesas en cada una de sus esquinas, cuya modalidad adquiere el nombre de “cubierta en culata”. Las cubiertas construidas en gablete o en culata forman en el interior de la casa un espacio cóncavo donde se acumula el aire caliente. Esta cámara de aire es separada a la altura de las soleras por medio de un cielorraso que generalmente es de cartón piedra, cartón embreado, *plywood* o madera machiembrada. (Durán & Brea, 2009)

Un proceso similar de mestizaje tuvo lugar en la frontera entre México y el territorio de la Honduras Británica, surgiendo un tipo de vivienda que combinaba la tradición de la casa maya y el modelo arquitectónico inglés (Figura 23). La cubierta de la casa maya tradicionalmente estaba hecha de palma de huano pero su progresiva escasez, debida a la deforestación y el crecimiento demográfico, condujo a la aparición de otros materiales de cubierta como las láminas de zinc e incluso de cartón. Las cubiertas metálicas onduladas son una característica propia del bungalow inglés, tipología habitacional introducida por la población vinculada a la administración de la colonia británica.



Figura 23. Viviendas en Chetumal, México (izquierda) y en Corozal, Belice (derecha). Fuente: Checa-Artasu, 2009.

Una de las características principales de esta arquitectura son los tejados de lámina de zinc dispuestos a dos o cuatro aguas para permitir una evacuación rápida de las lluvias, y la articulación de sistemas de captación de agua a través de canaletas conectadas a un depósito de tablas de madera a manera de tina. En todas las casas hay una separación entre las láminas de zinc y los envigados del espacio de habitación por falsos plafones, cuya función es crear cámaras de aire para termorregular la vivienda (Checa-Artasu, 2009).

En conclusión, la incorporación de las láminas de acero galvanizado como componente común en la vivienda de las zonas tropicales parece haber comenzado en los países del Caribe, por influencia del estilo arquitectónico de las compañías bananeras (Patiño, 1990). Su popularidad se debe a las ventajas que brinda para el almacenaje y transporte, el bajo costo de construcción y transporte, la facilidad

constructiva y la impermeabilidad que ofrece (Durán & Brea, 2009). Si bien las láminas galvanizadas no son el material idóneo para los climas cálidos, debido a la radiación de calor producida por su exposición al Sol, su preeminencia, como la del hormigón armado, es permitida por la vulnerabilidad propia de los materiales orgánicos ante la lluvia y los insectos, su complejidad de colocación, el costo de mantenimiento y los problemas de deforestación.

La doble cubierta ventilada con lámina metálica en la arquitectura contemporánea

La arquitectura contemporánea le ha exigido al techo funciones que no le eran habituales, como por ejemplo ayudar con la ventilación, favorecer la iluminación natural, producir sombras en las ventanas para reducir la radiación solar y aliviar el enfriamiento del interior. El techo así concebido comienza a tomar un protagonismo inédito en la arquitectura tropical contemporánea. (Stagno, 2004)

En los climas cálidos, donde la principal necesidad es minimizar las ganancias de calor en los techos, son deseables altos valores de reflectancia solar y emisividad térmica, que se pueden encontrar en las superficies de metal pre-pintadas con colores claros y/o pigmentos reflectantes de radiación infrarroja.

En la actualidad las láminas metálicas son utilizadas como segunda cubierta en edificaciones de distintos usos, saliendo del esquema tradicional de techos inclinados a dos o cuatro aguas, en la actualidad se incorporan armaduras metálicas para soportar las láminas sobre el techo principal de la edificación y se utilizan grandes aleros para optimizar la protección solar.



Figura 24. Ejemplos de uso de láminas metálicas en sistemas doble cubierta para climas cálidos. (1) Surgical Clinic and Health Center (Kere-Architecture, 2014). (2) Casa Cubierta (Garza, 2015). (3) Centre de L'architecture en terre (Baan, 2011). (4) National Park of Mali (Baan, 2011). (5) Kangaroo Valley House (Michael, 2005).

La Figura 24 presenta ejemplos de construcciones con segunda cubierta metálica en lugares con clima cálido, si bien no se cuenta con datos específicos sobre su comportamiento térmico, es posible observar en todos los casos la semejanza en la altura del espacio entre la cubierta de lámina y el techo principal, y la configuración alargada de las edificaciones, características que propician el paso libre del aire entre las cubiertas.

Cada proyecto es diferente, como material de cubierta el metal galvanizado ofrece gran flexibilidad y opciones para lograr las metas de diseño de cada edificio tanto en términos de estética como funcionalidad, en todos los casos las láminas metálicas no son la solución por sí mismas, si no que forman parte de un sistema y trabajan en conjunto con los demás elementos de la construcción.

Ventajas y propiedades de las cubiertas metálicas

Las láminas de metal han sido un material de cubierta usado durante siglos, hoy en día están disponibles en una amplia variedad de sustratos, colores, texturas y perfiles, y tienen muchos atributos como la flexibilidad de diseño, la sostenibilidad, resistencia, durabilidad y bajo coste de ciclo de vida.

Una de las ventajas del uso de láminas metálicas es la facilidad de mantener bajos coeficientes de absorción en su superficie por medio de la limpieza continua o aplicando nuevas capas de pintura u otros recubrimientos especiales cuando sea necesario, con esto se contribuye a la mejora del ambiente interior de las edificaciones al incrementar el albedo y reflejar y emitir gran parte de la radiación solar hacia la atmósfera.

La reflectancia es de las propiedades más importantes, ya que esta indica la cantidad de energía radiante que una superficie refleja y, por tanto, energía que no entra al recinto, para las láminas metálicas el valor de reflectancia es de 0.70 a 0.80, pigmentos especiales pueden tener valores de 0.90. El impacto de la emitancia en la temperatura del techo es tan importante como la reflectancia, la emitancia de un metal sin pintar es de 0.10 y para el metal con pintura blanca es de 0.90 (Miller et al, 2003).

A diferencia de cubiertas ventiladas fabricadas con otros materiales, la cubierta con lámina metálica tiene a su favor que puede desempeñarse como radiador nocturno en los periodos del año en que la humedad del ambiente es baja y la temperaturas ambiente es elevada.

El enfriamiento por radiación no es específico de las cubiertas metálicas, sin embargo, su comportamiento es más eficiente al ser un material de alta conductividad, alta emisividad (en el caso de que no se trate de una superficie pulida ya sea por falta de mantenimiento o aplicación de un acabado superficial no metálico) y muy poca masa (Escobar, 2013).

Otro beneficio de los techos metálicos es que poseen una larga vida en comparación con materiales de origen orgánico al tener la capacidad de resistir la exposición prolongada a los elementos del ambiente, además de poseer un bajo costo de mantenimiento.

De acuerdo con datos de la Cool Metal Roofing Coalition (2010), los productos para techos de metal que se fabrican hoy en día tienen garantías de los fabricantes que duran de 20 a 50 años, y la mayoría de los productos han sido diseñados para que puedan ser restaurados en sitio para prolongar su uso una vez que su acabado original llega a al fin de su vida útil, los materiales para techos metálicos son reciclables al 100% y pueden ser removidos con facilidad.

La ligereza del material es otra propiedad importante, debido a su bajo peso los sistemas de techo metálicos tienen menos exigencias en materia estructural para un edificio, esto los hace una excelente opción para proyectos de remodelación y el diseño sismo-resistente. Además, las cubiertas metálicas no requieren de mano de obra ni equipo muy especializado en su instalación.

Con un diseño adecuado, los sistemas de doble cubierta ventilada que incorporan láminas metálicas pueden contribuir al ahorro de energía mediante la reducción del efecto de la radiación solar directa sobre los techos y con ello las cargas de refrigeración en los edificios.

El comportamiento térmico de las cubiertas

El elemento de la envolvente de las edificaciones con mayor exposición a la radiación solar directa es la cubierta, la radiación solar que recibe (12 horas diarias anuales en los lugares próximos al Ecuador) se convierte en casi un tercio de las ganancias de calor de una casa (Sosa & Siem, 2004), por lo tanto este elemento tiene especial importancia para el comportamiento térmico al interior de las edificaciones y debe prestarse especial atención a su diseño y materiales.

La radiación solar que reciben las cubiertas llega a través de ondas electromagnéticas, una parte de esta radiación es absorbida y el resto se refleja hacia la atmósfera. La parte de la radiación absorbida se transforma en energía térmica que se acumula en los cerramientos, los cuales ceden el calor hacia el interior calentando el aire, por lo que se puede deducir que aunque la cubierta sea una barrera ante la radiación, no lo es respecto a la energía térmica (Serra, 1999).

En este apartado se profundiza en los factores que intervienen en el intercambio térmico entre el exterior y el interior de las edificaciones a través de las cubiertas, como son su posición respecto al Sol, la intensidad de la radiación que recibe y el efecto que tienen los materiales, con el objetivo de definir cuáles son las variables más importantes en el comportamiento térmico de las cubiertas.

Procesos de transferencia de calor a través de la cubierta

De acuerdo con Martín (2004) en la transmisión del calor a través de los cerramientos, entre el ambiente exterior y el ambiente interior de los edificios, se distinguen varios mecanismos de transferencia y regiones donde se realizan:

- Superficies, en contacto con el ambiente exterior e interior, donde se intercambia calor por radiación y convección entre el ambiente y el interior del cerramiento.
- Interior del cerramiento, donde se transmite calor por conducción entre ambas superficies a través de varias capas, y se almacena calor por acumulación en su masa térmica.
- Aislamientos, que son regiones del interior del cerramiento con elevada resistencia térmica y sin acumulación de calor.

Las fuerzas térmicas que actúan en el exterior de una edificación son una combinación de los impactos por convección y radiación. La radiación actúa a través de la radiación solar directa y el intercambio de calor con la temperatura del aire del entorno y con el cielo. La convección actúa en función del intercambio con la temperatura circundante y puede acelerarse a través del movimiento del aire.

La transferencia de calor a través de los cerramientos de los edificios (Figura 25), y por consiguiente de las cubiertas, se produce por conducción, convección y radiación, fenómenos que ocurren de forma simultánea y concurrente, lo que hace difícil distinguir con exactitud la contribución de cada mecanismo en la transmisión de calor entre el ambiente y el cerramiento.

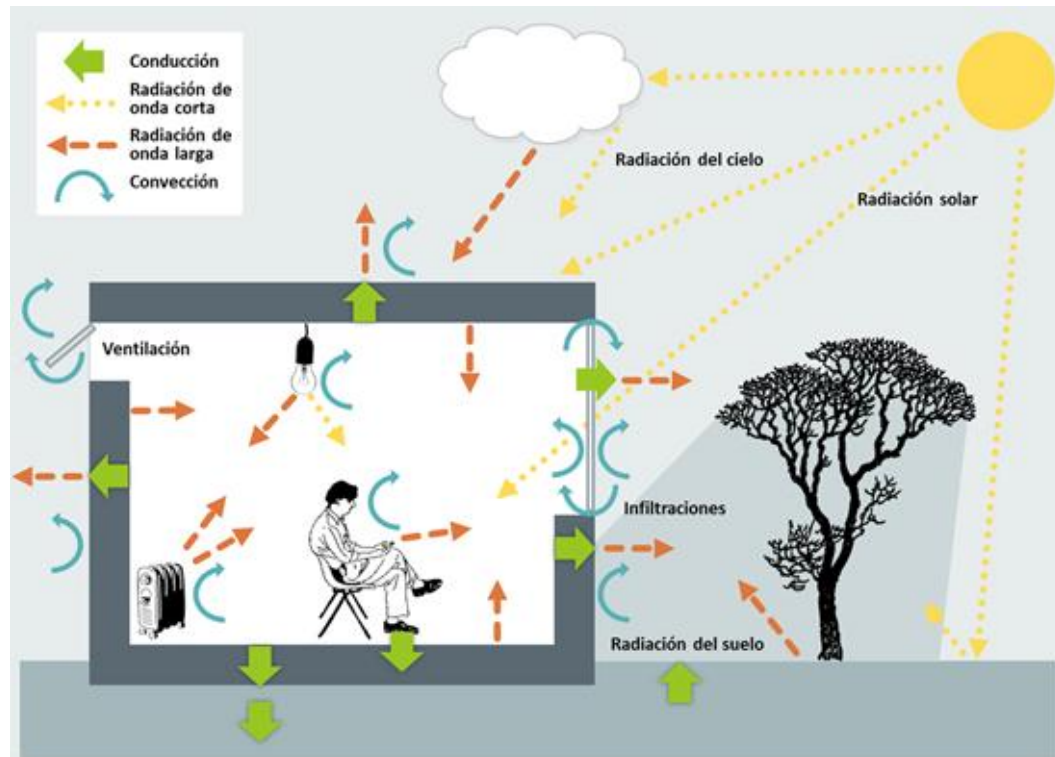


Figura 25. Transmisión de calor en los edificios. Fuente: Blender, 2015.

Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor debido a la actividad molecular, donde las partículas con más energía entregan energía a las menos energéticas, produciéndose así el flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. La transferencia de calor por conducción es de particular importancia en materiales sólidos sujetos a una diferencia de temperaturas debido a su alta densidad, que frecuentemente es un indicador de conductividad térmica, esta relación se debe a que el aire tiene baja conductividad ($0.026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) y los materiales ligeros tienen poros que lo contienen por lo que su conductividad tiende a ser menor.

La conducción es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos, tales como el interior de los cerramientos. Cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio (Martín, 2004).

La Figura 26 ilustra el mecanismo de conducción en su modelo más sencillo, donde se presenta un cerramiento de un cierto material a uno de cuyos lados se encuentra un sistema a una temperatura T_1 (temperatura del aire exterior) y al otro uno a temperatura T_2 (temperatura de una habitación) produciéndose un flujo de calor (Q) desde el sistema a mayor temperatura al de menor. Este flujo de calor depende de varios factores:

- La diferencia de temperaturas $\Delta T = T_2 - T_1$, cuánto mayor sea ésta, más grande es el flujo de calor.
- El espesor del material intermedio, Δx , cuanto mayor sea, menos calor fluye.
- El área A del material.
- Las propiedades del material intermedio, como la conductividad térmica (k).

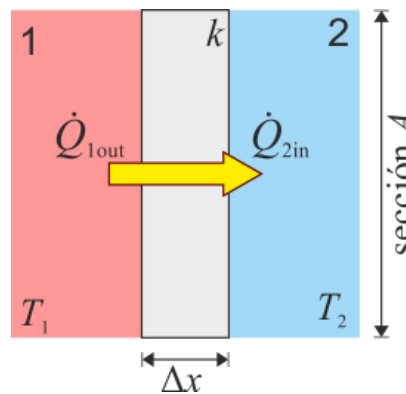


Figura 26. Transmisión de calor por conducción. Fuente: Laplace, 2015.

Cuando el cerramiento se encuentra en equilibrio térmico, el flujo de calor y la temperatura en cada punto del mismo permanecen constantes, este proceso se denomina transmisión de calor en régimen estacionario, cuando no existe equilibrio térmico el proceso se denomina transmisión en régimen transitorio, y se produce debido a que el cerramiento no ha podido estabilizarse o las condiciones del entorno son variables. Este último proceso se caracteriza porque la temperatura en cada punto del cerramiento varía en el tiempo, una consecuencia de esto es la acumulación del calor debida al calor específico de los materiales.

Convección

Se llama convección al proceso resultante del intercambio de calor por el movimiento de masa de un fluido (líquido o gas), puede ser libre o natural, producida sólo por la diferencia de densidades del fluido, o forzada, cuando la materia se mueve fundamentalmente debido a fuerzas exteriores (como el viento). El intercambio de calor por convección se produce cuando el aire de un ambiente se pone en contacto con la superficie de un cerramiento a una temperatura distinta.

De acuerdo con Martín (2004) la convección libre es la que se suele considerar en ambientes interiores, donde se estima que el aire permanece prácticamente en reposo, y la convección forzada habitualmente se considera en superficies en contacto con el ambiente exterior.

Interesa especialmente la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y la superficie que lo limita cuando ambos tienen diferente temperatura (Figura 27). En los primeros instantes se produce una transmisión por conducción, pero una vez que el fluido en contacto con la superficie modifica su temperatura sufre una diferencia de densidad respecto al resto del fluido y es desplazado por éste al actuar las fuerzas gravitatorias, el movimiento puede ser ascendente si la temperatura aumenta y descendente si la temperatura disminuye.

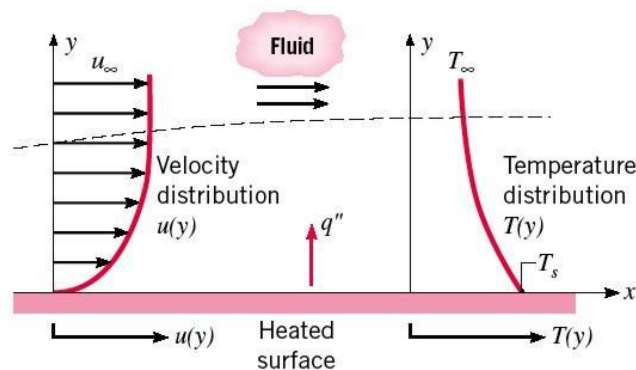


Figura 27. Transferencia de calor por convección entre un fluido y una superficie. Fuente: Rebolledo, 2014.

El parámetro que relaciona el flujo de calor entre una superficie y el ambiente se llama *Coefficiente superficial de transmisión de calor por convección* (h), cuyo recíproco es el *Coefficiente de resistencia térmica superficial*, el cual se reduce en aquellas condiciones que favorecen la convección, como son el flujo de calor ascendente (convección natural) y la influencia de viento al exterior (convección forzada).

De lo anterior se desprende que el proceso de transferencia de calor por convección es muy complejo, ya que el Coeficiente h depende de muchos factores como son la geometría del sistema, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades termodinámicas del fluido y las propiedades de transporte.

Radiación

El proceso de transferencia de calor por radiación no está vinculado a soporte o vehículo material alguno, por lo que no puede ser explicado en términos de moléculas en contacto o que se desplazan, ésta transferencia térmica por radiación ocurre de un cuerpo a otro sin contacto directo, en forma de ondas electromagnéticas, las cuales no dependen de un medio material para propagarse.

A una temperatura dada todos los cuerpos que poseen energía interna tienen la propiedad de transformar una parte de ésta en energía radiante. Un cuerpo caliente transforma una parte de su contenido de calor

en energía radiante sobre su superficie, la cual es emitida en forma de ondas que al ser absorbidas por otro cuerpo, se manifiesta en forma de calor.

La longitud de onda y la potencia relativa de la radiación emitida dependen de la temperatura del cuerpo, para las temperaturas habituales a nuestro alrededor, el espectro de las radiaciones térmicas, está dentro del rango de longitudes de onda entre 0.2 y 50 μm .

Los materiales intercambian radiación térmica con su entorno en función de las características de su superficie, entre otros parámetros, se distinguen dos aspectos del fenómeno: la superficie es al mismo tiempo emisora y receptora de radiación térmica.

Como se muestra en la Figura 28, la transferencia de calor entre una superficie y un gas implica la emisión de radiación por la superficie (E) y puede implicar también la absorción de radiación incidente de los alrededores (irradiación, G), así como procesos de convección. Influyen además la emitancia de la superficie (ϵ), su absorptancia (α) y su temperatura superficial (T_s). En el intercambio radiante entre una superficie y su entorno, influye además el área de la superficie (A) y la temperatura uniforme del entorno (T_{sur}), implicando procesos combinados de convección y radiación. Si la temperatura del entorno es superior a la del cuerpo se produce absorción neta de calor por radiación, mientras que si el cuerpo está a mayor temperatura que el ambiente es a la inversa.

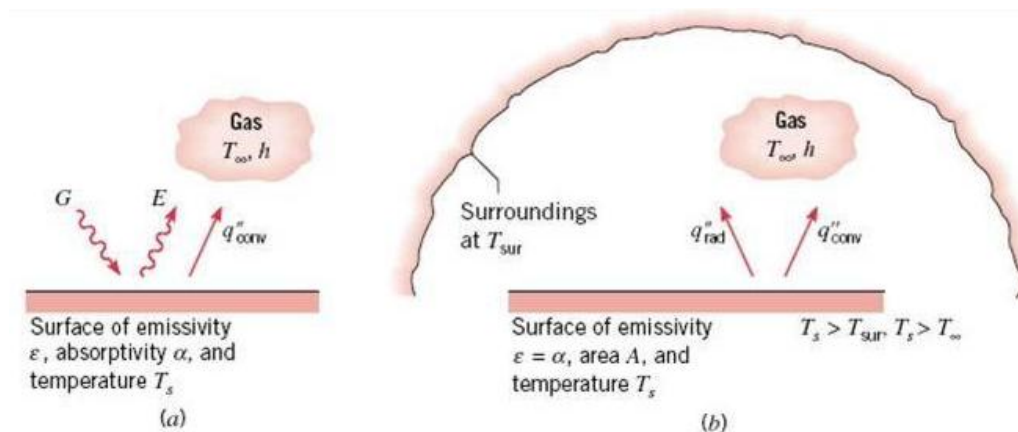


Figura 28. Intercambio radiante: (a) en una superficie; (b) entre una superficie y el medio que lo rodea. Fuente: Rebolledo, 2014.

La superficie receptora de cierta cantidad y tipo de energía radiante, se comportará ante esta de acuerdo al ángulo de incidencia y a las características físicas y el espesor del material irradiado. La mayor parte de los materiales de construcción absorben la radiación de onda larga, independientemente del color de su superficie, excepto los metales que son buenos reflectores para este tipo de radiación. Con relación a la radiación de onda corta el comportamiento de los materiales de construcción sí depende del color de su superficie y absorben sólo una parte de la radiación incidente.

El efecto térmico de los materiales

Además de los mecanismos de transmisión del calor según principios físicos, las características distintivas de los materiales como la densidad y la capacidad de absorción y emisión de energía térmica, pueden repercutir en fenómenos de almacenamiento, aislamiento o retraso de la energía térmica en los cerramientos. Aquellos materiales que reflejan más radiación de la que absorben y que emiten rápidamente la cantidad absorbida, permitirán temperaturas más bajas dentro de una edificación.

La resistencia y capacidad térmica de un material están directamente relacionadas con la densidad: los materiales ligeros tienen alta resistencia y baja capacidad térmica, mientras que los materiales densos poseen poca resistencia pero tienen una alta capacidad térmica.

La variación diaria de las cargas térmicas a las que está expuesta una edificación origina su correspondiente oscilación en el interior pero con dos diferencias:

- El ciclo interno se amortiguará, es decir, las variaciones de temperatura serán más pequeñas. Esto depende del coeficiente de transmisión de calor del material, mientras menor sea éste mejor será el efecto aislante, debido a la reducción del flujo de calor.
- El ciclo interno sucederá al externo. Ambos ciclos estarán desfasados, dependiendo de la capacidad térmica del material, mientras mayor sea el calor acumulado antes de aumentar su temperatura, menor será la variación de temperatura propagada a través del material. Este retardo en la transmisión de calor es conocido como inercia térmica, la cual posibilita el almacenamiento de las cargas térmicas para liberarlas cuando baja la temperatura del ambiente.

La inercia térmica de los materiales de una envolvente es por lo general proporcional a la masa y a la densidad de sus materiales, estos tendrán mayor capacidad de acumulación y desfase de la energía térmica dentro de ellos mientras mayor sea su densidad y espesor. La elección de materiales con alta inercia térmica es dispensable en las zonas tropicales, debido a que las pequeñas variaciones de temperatura diaria no garantizan un efecto de inercia térmica.

En estas zonas, debido a que la temperatura permanece prácticamente constante durante noche y día, los edificios no pueden perder el calor almacenado durante el día y enfriarse significativamente durante la noche. Las temperaturas superficiales de las paredes y cubiertas tienden a estabilizarse al mismo valor que la del aire, en consecuencia, las pérdidas de calor por radiación son despreciables, siendo preferibles las construcciones ligeras con materiales de baja capacidad térmica.

Posición respecto al Sol e intensidad de radiación

El número de horas de radiación solar que recibe un lugar determinado cada día es producto de la inclinación de 23.7° respecto a la perpendicular del eje de la Tierra y de la posición relativa del Sol en su rotación anual. La latitud del lugar determina la inclinación con la que caen los rayos del Sol, el ángulo de incidencia solar no es el mismo en verano que en invierno, estas variaciones son causadas por la inclinación del eje de rotación de la Tierra y son la causa principal de las diferencias estacionales.

Para el hemisferio norte, la máxima ganancia de calor solar en el invierno se obtiene con orientación al Sur y la cantidad mínima con orientación Norte. Durante el verano, la máxima ganancia de calor es por el Este y Oeste, en estas orientaciones el ángulo de incidencia solar es bajo por la mañana y por la tarde. La intensidad máxima de la radiación solar en un día determinado, se produce durante el periodo de cuatro horas en torno al mediodía solar.

En invierno cuando los rayos solares inciden con mayor inclinación calientan mucho menos porque el calor atmosférico tiene que repartirse en un espesor mucho mayor de atmósfera, con lo que se filtra y dispersa parte de ese calor.

La inclinación de las cubiertas es decisiva para ejercer un control solar efectivo sobre las edificaciones, las cubiertas horizontales reciben toda la radiación solar disponible en el día; cuando están inclinadas se puede disminuir el tiempo de incidencia del sol sobre ellos, dependiendo de la inclinación misma y de su orientación (Gómez, 2003).

Las cubiertas horizontales reciben toda la radiación disponible durante el día, el número de horas que incide el Sol sobre este tipo de techos depende de la duración del día solar, el ángulo de incidencia, el día del año, y la hora del día; asimismo tanto la incidencia solar como la cantidad de radiación no dependen de la orientación del edificio.

Estudios realizados por Jayasinghe et al (2003) muestran que el efecto de la orientación del techo en las condiciones térmicas interiores de una casa (con características pasivas como colores claros para paredes y elementos de sombra para ventanas) es insignificante en los climas cálidos húmedos.

De acuerdo con Gómez (2003), en el caso de las cubiertas inclinadas la cantidad de radiación recibida depende de la latitud, el día del año, la orientación y la pendiente de la cubierta. Cuando la pendiente está orientada hacia el Sur durante el invierno recibe mayor cantidad de energía debido al efecto combinado de la inclinación del techo y la declinación solar, que hace que durante el mediodía solar los rayos incidan de manera más cercana a la perpendicular sobre la cubierta.

En cambio durante el solsticio de verano el azimut del Sol se encuentra entre los 90° y los 270° durante casi todo el día, y a pesar de que el día es más largo, cuando la cubierta se orienta hacia el Norte su

inclinación disminuye la intensidad de la radiación recibida. Cuando el techo se orienta hacia el Este o el Oeste la duración del soleamiento es menor dependiendo del día y de su inclinación.

Si la orientación de la construcción es más cercana al Norte que al Sur, es decir con azimut entre 90° y 270° , es recomendable tener cubiertas con poca inclinación, pero si la orientación es más próxima al Sur, con azimut entre -90° y 90° , es conveniente incrementar la inclinación lo más posible.

Durante los equinoccios y el solsticio de invierno, la orientación óptima de la cubierta es hacia el Norte, pues se recibe menor energía al tener mayor inclinación; ésta podría considerarse la orientación más recomendable en los lugares que son calurosos durante todo el año, pero es necesario comprobarlo considerando la envolvente en conjunto.

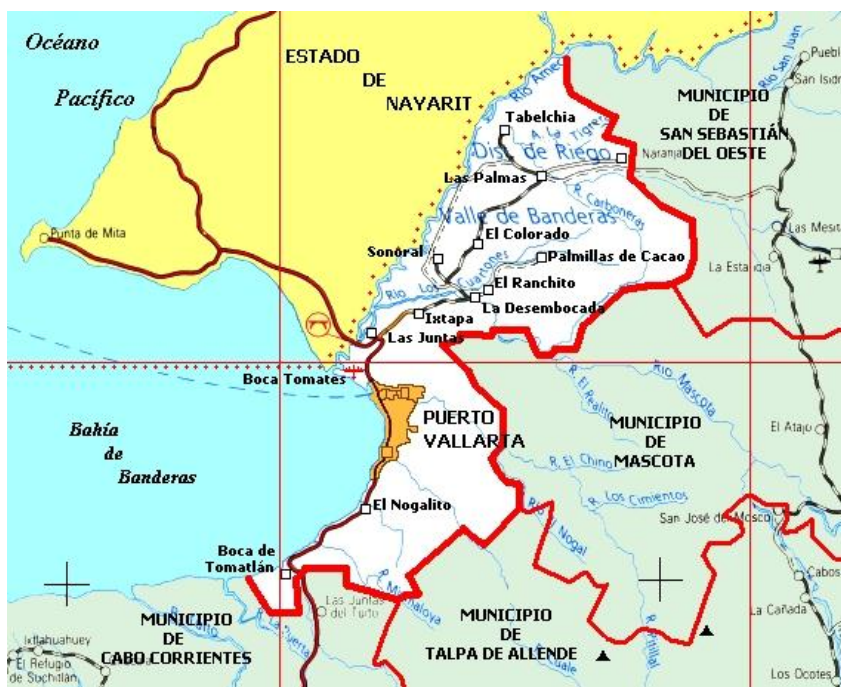
La intensidad o potencia de la radiación solar incidente en cada lugar la determina la inclinación con que provengan los rayos solares para un determinado flujo energético, de tal manera que la potencia por unidad de superficie es mayor en la radiación que llega perpendicularmente a un plano, que en la radiación que llega inclinada, pues el mismo flujo de radiación se ha de repartir sobre una superficie mayor. Además la longitud que recorre el rayo de Sol aumenta conforme disminuye la altura solar y como se desplaza a través de un grosor más grande de atmósfera también aumenta la pérdida de energía por absorción y reflexión.

La irradiación también conocida como insolación se refiere a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo (Mendoza, 2011), su unidad de medida es el Wh/m^2 , por su comportamiento puede dividirse en tres componentes:

- Directa: Se recibe directamente desde el Sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
- Difusa: Se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul.
- Reflejada: Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

La irradiación solar global es la radiación total incidente sobre una superficie, sumatoria de la radiación solar directa, difusa y reflejada.

En México el promedio de radiación solar anual recibida va de los 4.4 kWh/m^2 por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m^2 por día en el norte del país, esta zona es de las más soleadas del mundo. La mitad del territorio nacional presenta una insolación promedio de 5.3 kWh/m^2 por día.



S

Sus recursos hidrológicos son proporcionados por el río Ameca por ser el que lo limita con Nayarit. Le sigue por su importancia el río Pitillal y el río Cuale. Hay además varios arroyos permanentes, como: el Camarones, Santa María y El Nogal, otros temporales como: El Palo de Santa María y Agua Zarca. También existen varios esteros.

La vegetación se compone básicamente de pasto con manchones de vegetación baja espinosa, sobre todo en zonas semiplanas, lomas y laderas. En la franja costera abundan las palmeras y otras especies tropicales y frutales como el mango, guanábano y aguacate. En los cerros y bosques hay cedro, caoba, nogal y parota. También existe una amplia zona de mangle. La fauna predominante se compone de aves tropicales como pericos, guacamayas y palomas, además de venados, tigrillos, iguanas y otros reptiles e invertebrados, así como la fauna marina.

Climatología y Geometría solar

Clasificación climática

El clima de Puerto Vallarta está controlado por la interacción de las corrientes marinas que circulan frente a las costas de la Bahía de Banderas; es sensible a las variaciones estacionales y a los procesos climáticos globales como el fenómeno de El Niño, etc. A lo largo del año se dan variaciones notables en el patrón de corrientes sin embargo se puede considerar que el clima de la región es estable. (Ayuntamiento de Puerto Vallarta, 2012)

De acuerdo con los datos de las normales climatológicas del periodo 1951-2010 de la estación meteorológica #14116 ubicada en Puerto Vallarta, Jalisco, esta localidad tiene una clasificación climática $As(x')(i')$, según Köppen-García, que corresponde a un clima cálido húmedo con poca oscilación, no es tipo ganges y presenta canícula.

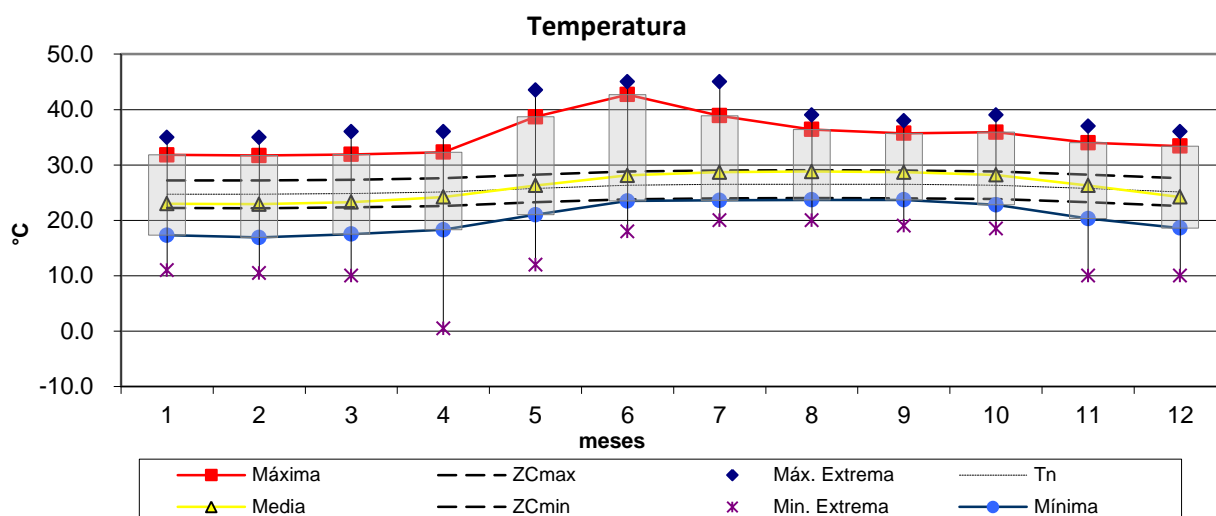
Desde el punto de vista del diseño bioclimático, la temperatura del aire y su contenido de humedad son determinantes en la elección de las estrategias de climatización a utilizar, ya que el efecto térmico de los materiales involucrados en la configuración de los edificios dependerá de la interrelación de ambos factores.

Temperatura

La temperatura neutra o de confort para Puerto Vallarta es de 25.8°C ¹¹ con un límite de $\pm 3.0^{\circ}\text{C}$, la temperatura media anual es de 26.1°C y se encuentra en confort durante todo el año, la temperatura máxima mensual está siempre por arriba del límite superior de confort. La oscilación promedio anual es

¹¹ De acuerdo con el modelo de cálculo del Standard 55 de la ANSI/ASHRAE.

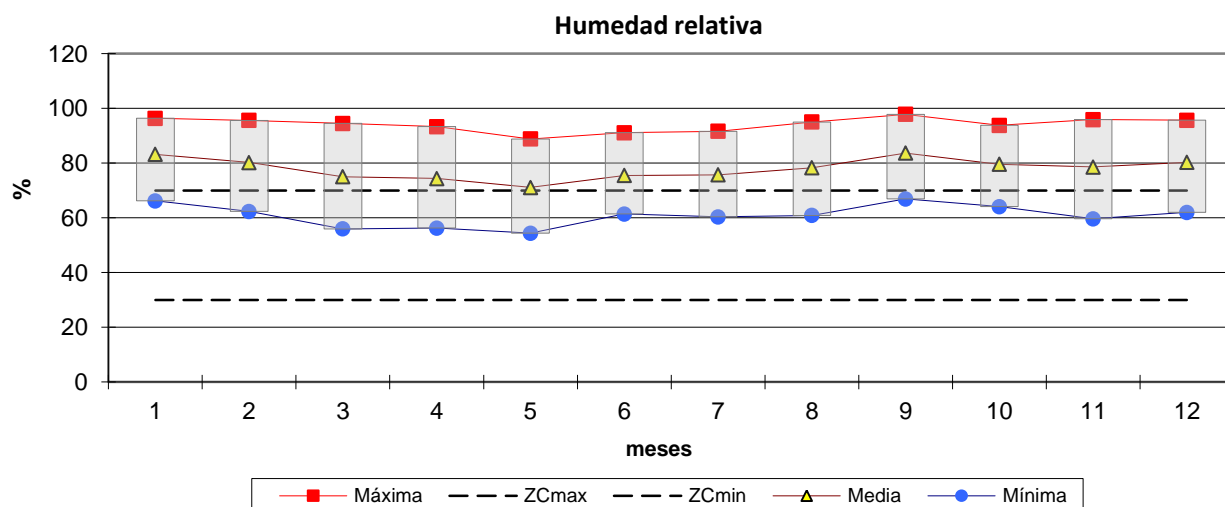
14.7°C, los meses con mayor oscilación son mayo y junio, el resto del año la relación entre la temperatura media y la máxima es constante.



Gráfica 1. Promedio de temperatura mensual en Puerto Vallarta.

Humedad relativa

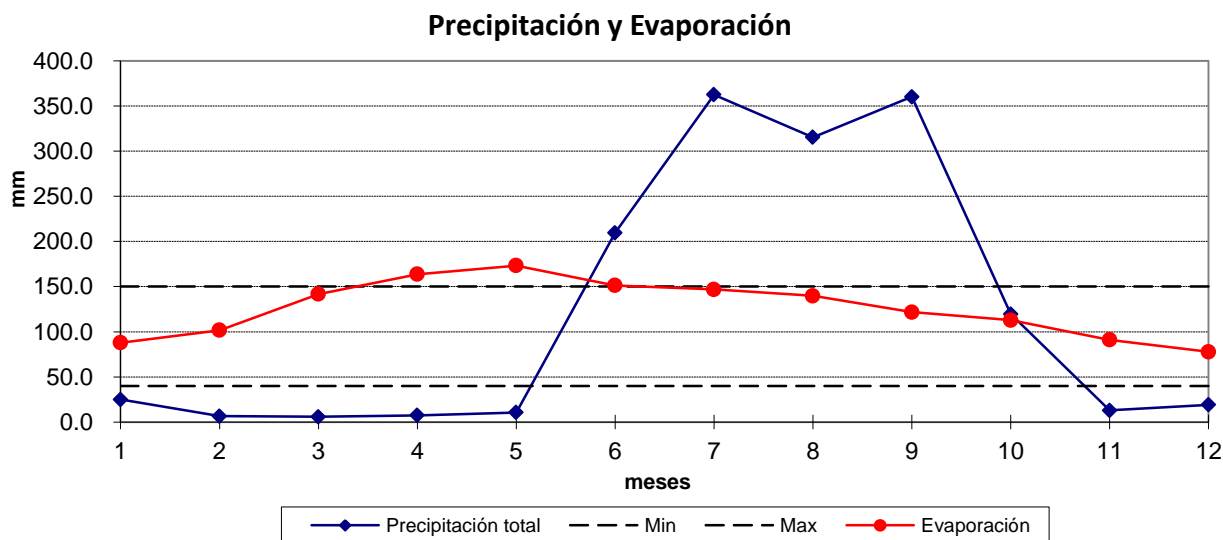
La humedad es muy alta, debido en parte a la frecuente nubosidad y fuertes precipitaciones irregulares. La humedad relativa media al igual que la máxima, están fuera del rango de confort durante todo el año, sobrepasando el 70%, la humedad relativa mínima está en confort todo el año, septiembre es el mes más húmedo, y marzo y abril son los meses con mayor oscilación.



Gráfica 2. Promedio de humedad relativa mensual en Puerto Vallarta.

Precipitación

Se aprecia una marcada temporada lluviosa, hay precipitación considerable a partir de junio y sigue su aumento hasta septiembre, durante octubre disminuye y se mantiene constante hasta fines de mayo. Febrero, marzo y abril son los meses con menos precipitación. La evaporación es alta (hasta un máximo de 173.2 mm) desde marzo a mayo y disminuye en junio, mes durante el cual comienza la temporada de lluvias.



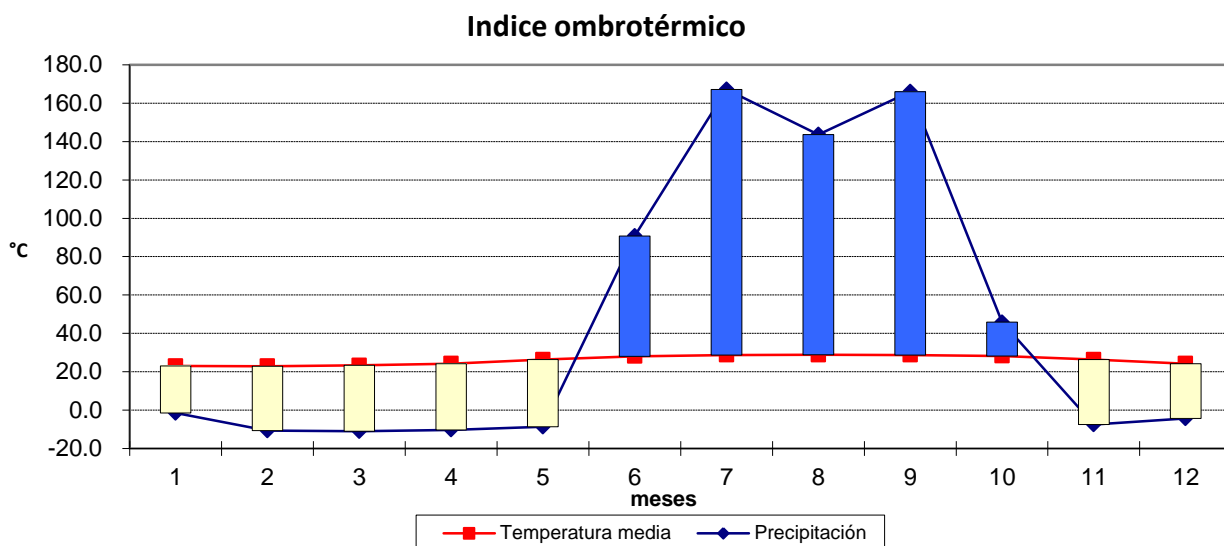
Gráfica 3. Precipitación total y Evaporación promedio mensual en Puerto Vallarta.

Índice ombrotérmico

Puerto Vallarta es un municipio cálido, con una temperatura media anual de 26.1°C, y precipitaciones anuales de hasta 1454.6 mm. Se considera que un mes es seco si la precipitación es inferior al doble de la temperatura, por lo que si hacemos una distribución ideal de estas lluvias, suponiendo que cada mes la temperatura es la media anual (26.1°C), debería llover más de $26.1 \times 2 = 52.2$ mm al mes.

De acuerdo con los datos mensuales normales, dicha condición se cumple durante los meses de junio a octubre, cuando llueve más que lo mínimo necesario. Una forma más rápida de hacer la comparación es dividir la precipitación total entre 24 y compararla con la temperatura media: $1454.6/24 = 60.6 > 26.1$, por lo tanto se deduce que se trata de un clima húmedo.

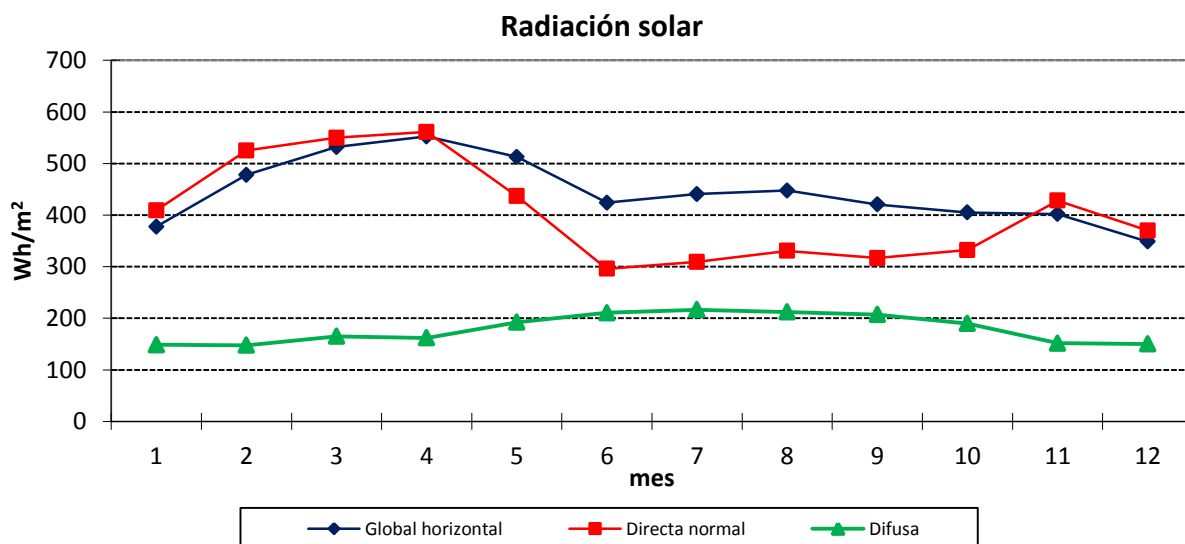
La relación entre temperatura y precipitación revela que la época húmeda en Puerto Vallarta abarca 5 meses, de junio a octubre, los 7 meses restantes se consideran época seca. Cabe resaltar que los meses más calurosos son también en los que hay mayor cantidad de precipitación (Gráfica 4).



Gráfica 4. Índice ombrotérmico mensual en Puerto Vallarta.

Radiación

La radiación global (total) en Puerto Vallarta es alta, la mayor parte del el año sobrepasa los 400 Wh/m^2 , los meses con más radiación global son marzo, abril y mayo. La radiación directa es más alta de febrero a abril con un máximo de 560 Wh/m^2 , la temporada con menor radiación directa es de junio a octubre, coincidiendo con la temporada lluviosa, durante esos meses también es cuando se presenta un aumento de la radiación difusa.



Gráfica 5. Promedio de radiación solar mensual en Puerto Vallarta.

Geometría solar

La siguiente gráfica solar de proyección estereográfica corresponde a la latitud $20^{\circ} 37'$, donde se localiza Puerto Vallarta. Esta herramienta permite conocer las características geométricas del movimiento aparente del Sol a cualquier momento y hora del año, proyecta en planta y en distancias iguales las trayectorias solares calculadas matemáticamente.

Con esta gráfica es posible calcular la dirección e inclinación de los rayos solares incidentes en Puerto Vallarta a lo largo del año lo que permite optimizar el diseño de las protecciones solares. Se observa que durante marzo y abril, meses con mayor cantidad de radiación directa, los rayos solares tienen una inclinación máxima de 70° respecto al plano horizontal hacia el mediodía solar, y una inclinación mínima de 14° alrededor de las 17 horas. Hacia el solsticio de verano, en junio cuando la radiación directa es más baja y aumenta la radiación difusa, los rayos solares inciden de forma más perpendicular con inclinación de hasta 93° al mediodía y de 8° hacia las 18 horas.

Con esto se puede concluir que en Puerto Vallarta es necesario el control de los ángulos solares bajos que provienen del Sur y Suroeste durante todo el año, principalmente durante las tardes de la temporada calurosa desde mayo hasta octubre.

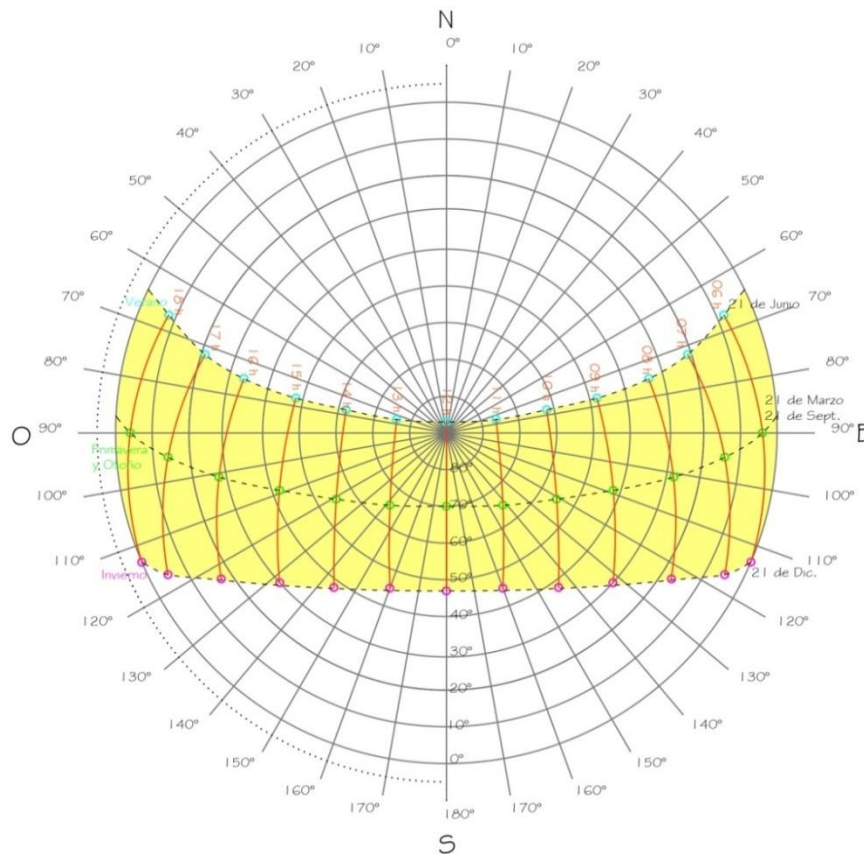


Figura 30. Gráfica Solar equidistante Latitud 20° , para Puerto Vallarta.

Viento

Los datos del viento correspondientes a la ciudad de Puerto Vallarta, muestran que con más frecuencia el viento tiene una dirección desde el Sur-suroeste y con menor frecuencia proviene del oriente.

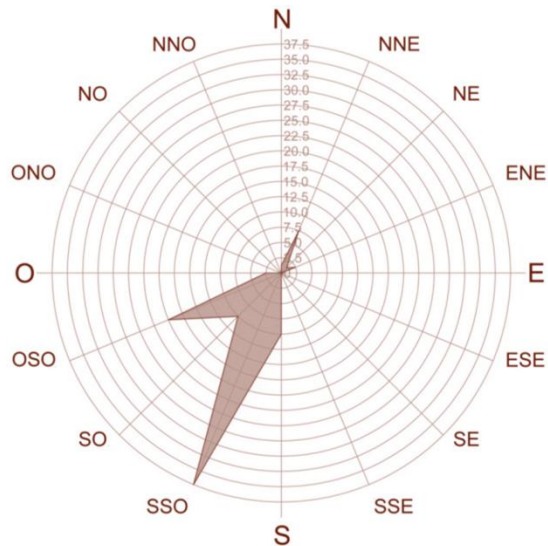


Figura 31. Distribución de la dirección del viento. Fuente: <http://windfinder.com>

A lo largo del año las velocidades del viento varían de 0 a 7.0 m/s (calma a brisa moderada). La velocidad máxima promedio del viento es de 4.0 m/s (viento suave), la velocidad máxima diaria es de 7.0 m/s, se produce alrededor del 16 de junio. La velocidad mínima media del viento es de 2.0 m/s (viento ligero), se produce alrededor del 01 de enero, cuando la velocidad máxima es de 5.0 m/s.

Cabe señalar que la orientación más propicia para aprovechar los vientos dominantes provenientes del Sursuroeste y del Oestesuroeste, es también la orientación solar menos recomendable en Puerto Vallarta, por lo que es necesaria la aplicación de estrategias de diseño para optimizar la protección solar sin obstruir el paso del aire.

Infraestructura y equipamiento

El municipio proporciona a sus habitantes los servicios de agua potable, alcantarillado, alumbrado público, rastro, mercados, estacionamientos, cementerios, vialidad, aseo público, seguridad pública, tránsito, parques y jardines y centros deportivos. En lo que concierne a servicios básicos el 95.9% de los habitantes disponen de agua potable; en alcantarillado la cobertura es del 94.1% y en el servicio de energía eléctrica el 98%.

Puerto Vallarta tiene infraestructura para comunicación vía terrestre, aérea y marítima. Está comunicado con la capital del Estado y con el resto del país por la carretera Guadalajara-Compostela-Vallarta, la cual continúa al sur hacia Manzanillo y por la carretera Guadalajara- Autlán- Vallarta; ambas en buenas condiciones. Cuenta con una red de caminos vecinales, algunos revestidos, otros de terracería y brechas que intercomunican los poblados del municipio y los municipios vecinos.

Vivienda

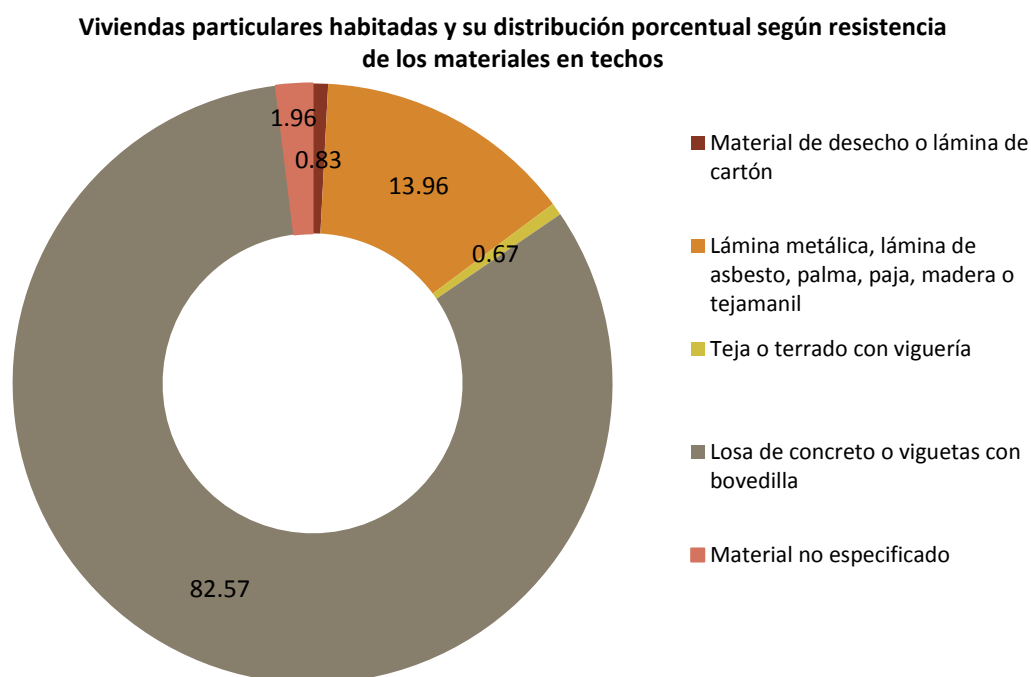
De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del 2010 realizado por el INEGI, Puerto Vallarta contaba con 68 677 viviendas particulares habitadas, la mayor parte de las cuales cuenta con electricidad, agua entubada y drenaje, sólo el 2.1% de las viviendas tiene piso de tierra.

Respecto al dato reportado en el censo del 2000 (44 313 viviendas particulares habitadas), el parque habitacional se incrementó en 24 364 viviendas, es decir, en diez años hubo un aumento del 54.9%; cabe señalar que la población en esos 10 años se incrementó en 38.4%, de lo que se infiere que la vivienda ha crecido a un ritmo mayor que la población.

Una característica de las viviendas importante para este estudio corresponde al material de los techos, según datos del censo del año 2000 la mayor parte de las viviendas en Puerto Vallarta tenía losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería, la lámina de asbesto o metálica es el segundo material más utilizado en el municipio con el 15.55% del total, la teja, el material tradicional de la región, ocupa el tercer lugar con el 5.16%. El censo de 2010 reporta que el 82.57% de las viviendas posee techo de losa o viguetas con bovedilla, el 13.96% techo de lámina metálica o asbesto u otros materiales orgánicos, y el 0.67% de teja o terrado con vigería (Gráfica 6).

De acuerdo con un estudio de mercado (Virgen & Gauna, 2011), de los tipos de desarrollos de vivienda que se construyen en la zona conurbada de Puerto Vallarta y Bahía de Banderas, el 32% son de Tipo Medio, el 19% Residencial, 22% Turístico Residencial, 15% de Interés social, 10% Residencial Media, y el 2%, Social Progresivo. En el caso concreto de Puerto Vallarta el 13% es turístico residencial, el 37% residencial, el 13% residencial medio y el 37% medio, no encontrando del tipo de interés social y social

progresivo. En cuanto a la oferta de casas que se ubican en el municipio, se detectó que el 80% son de tipo Medio, el 18% son Residenciales, el 1% son Residencial Medio y 1% son Residencial Turístico.



Gráfica 6. Viviendas particulares habitadas según material en techos, Puerto Vallarta. Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010.

Antecedentes arquitectónicos

Los materiales utilizados en la edificación vernácula van desde la palapa y la madera en las cubiertas, hasta el adobe, el bajareque y el ladrillo de medio pliego (ladrillo muy grande de la región), en los muros: las cubiertas generalmente son ligeras; aparte de la palapa se utiliza la teja de barro con pendiente ligera, unida con mortero sobre una trama de vigas y madrinas de madera con ladrillo de medio pliego antes de la teja. (Elizondo Mata, 2009)

El medio socio-cultural

Demografía y sociedad

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda de 2010, la población de Puerto Vallarta fue de 255 mil 681 personas; 50.3% hombres y 49.7% mujeres, comparando este monto poblacional con el del año 2000, se obtiene que la población municipal aumentó un 38.4% en diez años.

El municipio en 2010 contaba con 104 localidades, de las cuales, 13 eran de dos viviendas y 35 de una. La cabecera municipal de Puerto Vallarta es la localidad más poblada con 203 mil 342 personas, y

representaba el 79.5 por ciento de la población, le sigue Ixtapa con el 11.4, Las Juntas con el 3.5, Las Palmas de Arriba con el 1.6 y Banus Vallarta con el 0.5 por ciento del total municipal. (SIEG, 2012)

Puerto Vallarta en 2010 ocupaba a nivel estatal el lugar 123 en el índice de marginación con un grado muy bajo, en pobreza multidimensional se localiza en el lugar 103, con el 40.1% de su población en pobreza moderada y 5.4% en pobreza extrema; y en cuanto al índice de intensidad migratoria el municipio tiene un grado bajo y ocupa el lugar 123 entre todos los municipios del estado.

Economía

Conforme a la información del directorio estadístico nacional de unidades económicas (DENUE) de INEGI, el municipio de Puerto Vallarta cuenta con 11,910 unidades económicas a marzo de 2011 y su distribución por sectores revela un predominio de unidades económicas dedicadas a los servicios, siendo estas el 47.4% del total de las empresas en el municipio.

En cuanto a la participación de la población económicamente activa, la economía del municipio radica en el sector terciario representada por el 87.19%, el 6.99 al sector secundario, y un 2.71% correspondiente al sector primario. El 47.68% de la población con 12 años y más se dedica al sector servicios, le sigue en importancia el comercio con el 19.71%, y la construcción con 9.3%.

En lo respecta al nivel de ingreso económico poblacional, esta se ve predominantemente enmarcada dentro de un rango que va de 2 hasta 5 salarios mínimos, englobando a 46.41% de la población económicamente activa, ubicando a la población en un estatus de comodidad medio alto.

Marco metodológico

Diseño de la experimentación

Con el fin de evaluar el sistema de doble cubierta ventilada se realizó una investigación de tipo experimental descriptiva, la cual consistió en registrar en campo módulos experimentales con el fin de comprobar las hipótesis establecidas. El estudio fue diseñado de acuerdo con metodologías propuestas para estudios sobre cubiertas en climas cálidos, como son la utilizada por Vázquez (2008) en el estudio de cubiertas y estanques metálicos en clima cálido seco extremo, la de González C. & González G. (2013) para evaluar un techo-estanque en clima húmedo, y la de Herrera (2014) en un estudio comparativo de techos estanque en clima árido.

Para la realización de este trabajo fue necesaria la fabricación de tres módulos experimentales denominados ME1, ME2 y ME3, con las mismas características de forma, tamaño, dimensión, materiales y acabados, para asegurar que la carga térmica a través de paredes y piso fuera igual, a estos módulos se les incorporaron diferentes variables en la cubierta para la realización de tres fases experimentales consecutivas, que serán explicadas más adelante.

Descripción de los módulos experimentales

Se utilizaron tres módulos experimentales (denominados ME) de 80 cm de largo por 80 cm de ancho y 47 cm de alto, contruidos con una estructura de barrotes de madera de pino de 10x10 cm, y paredes y piso de MDF de 9mm, pintados en su exterior con pintura vinil-acrílica de color blanco. Fueron forrados al interior con placas de poliestireno expandido de 5 cm de espesor y sellados con silicón. A cada uno de los módulos se les colocó una cubierta de losa de concreto armado de 70 cm de largo por 70 cm de ancho y 12 cm de espesor y se ubicaron sobre una base de bloques de poliestireno de 10 cm por 15 cm para evitar el contacto directo con el suelo. La Figura 32 muestra la forma en que se dispusieron cada uno de los componentes antes mencionados para conformar los módulos.

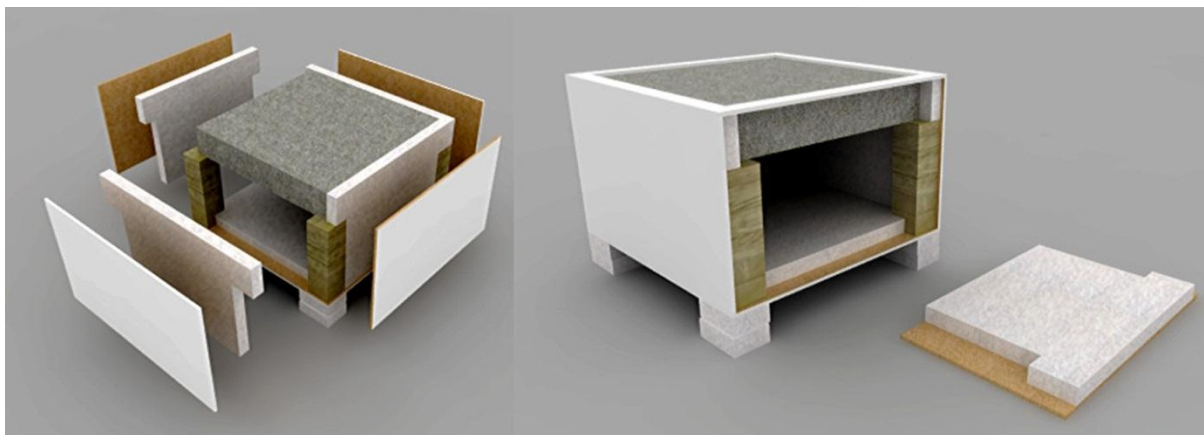


Figura 32. Características del módulo experimental.

Descripción de la cubierta secundaria

A dos de los módulos experimentales descritos en el apartado anterior, se les colocó una segunda cubierta diseñada con las dimensiones adecuadas para proporcionarle sombra a la losa durante la mayor parte del día (Figura 33 y Figura 34), los aleros Sur y Norte se dimensionaron según la inclinación del Sol durante los solsticios y equinoccios, y se colocó un parasol en el lado Oeste para proteger la losa de los rayos solares con ángulos bajos durante las tardes en esta orientación.

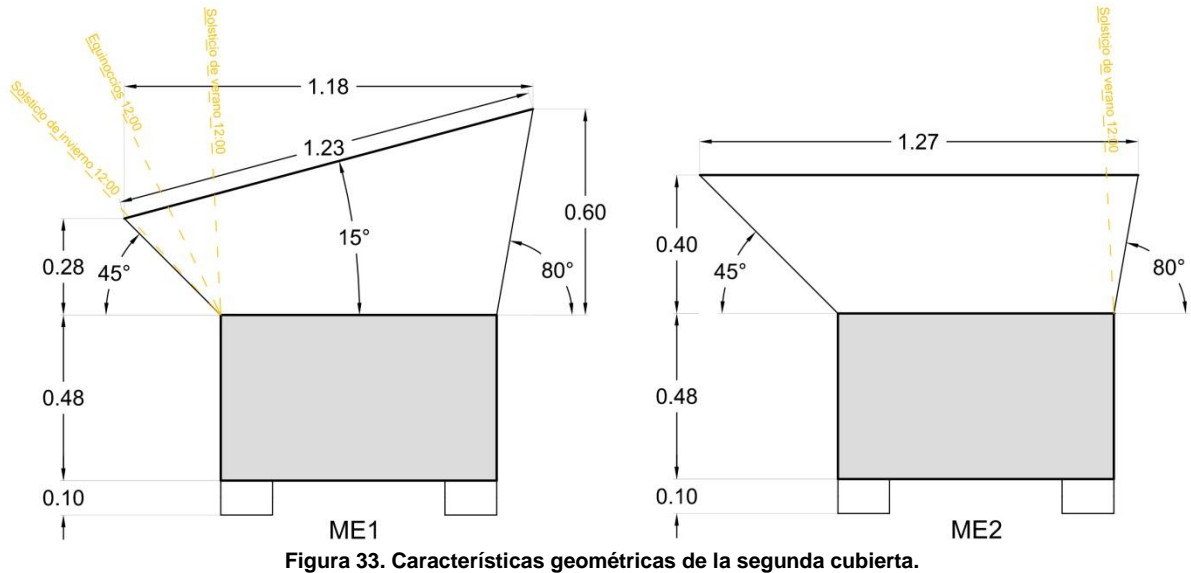


Figura 33. Características geométricas de la segunda cubierta.

ME1. Cubierta de lámina metálica calibre 26 con acabado pintor color blanco. Dimensiones: 0.80x1.23m. Posición: inclinada 15° hacia el Sur sobre estructura de madera de pino con la parte más baja a 28 cm de la superficie de la losa.

ME2. Cubierta de lámina metálica calibre 26 con acabado pintor color blanco. Dimensiones: 0.80x1.27m. Posición: horizontal sobre estructura de madera de pino, a 60 cm de la superficie de la losa.



Figura 34. Módulos experimentales (ME1 y ME2) y módulo de control (ME3).

La altura de la segunda cubierta respecto a la losa se determinó por medio de una prueba piloto realizada con antelación (ver Anexo 1), en la cual se midió la temperatura irradiada por la lámina metálica hacia el interior de un módulo de poliestireno cada 20 cm de distancia. Se determinó que pasados los 40 cm, la temperatura del aire al interior del módulo se estabiliza y se acerca más a la temperatura ambiente.

La inclinación se determinó con base en el estudio titulado “Desempeño solar de viviendas” (Gómez, 2003), donde se presentan las variaciones porcentuales de la energía proveniente de la radiación solar directa sobre un techo inclinado según la latitud (ver Anexo 2), los datos proporcionados por este estudio permitieron determinar la orientación e inclinación más desfavorables en la latitud del sitio en estudio, las cuales fueron utilizadas con la finalidad de evaluar el sistema de doble cubierta bajo las peores condiciones de soleamiento, infiriendo que su desempeño será mejor en cualquier otra orientación.

Descripción de equipo de medición

Para el registro de datos durante el experimento se utilizaron 3 data loggers tipo USB para humedad y temperatura marca Ampere modelo EL-USB-2 (Figura 35) con las siguientes especificaciones:

Humedad relativa:

- Rango de medición: 0 a 100%
- Repetición (a corto plazo): $\pm 0.1\%$ de HR
- Precisión (error general): mín. $\pm 3\%$, máx. 5% de HR
- Resolución interna: Típico 0.5% de HR
- Estabilidad a largo plazo: Típico 0.5% de HR

Temperatura:

- Rango de medición: mín. -35°C y máx. 80°C .
- Repetición: Típico $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
- Precisión (error general): Típico $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ máx. $\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Resolución interna: 0.5°C .

Punto de rocío:

- Precisión (error general) (25°C , 40-100% HR): Típico $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$.

Además se utilizaron, para el registro de temperatura en las superficies, 6 data loggers para temperatura con termopar tipo K, marca Ampere modelo EL-USB-TC-LCD con las siguientes especificaciones:

- Rango de medición de sonda tipo K: mín. -200°C , máx. 1350°C .
- Rango de temperatura operativa (aplica sólo para el módulo de registro de datos): mín. -10°C , máx. 40°C .
- Resolución (interna y mostrada): 0.5°C .
- Precisión (error de registro): $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

La programación del equipo y la descarga de información se realizaron a través del software EasyLog USB versión 5.53 proporcionado por el fabricante.



Figura 35. Data loggers modelo EL-USB-2 (izquierda) y EL-USB-TC-LCD (derecha).

Para instalar los termopares sobre las superficies a evaluar se cubrió cada sensor con grasa de silicón disipadora de calor, y se fijaron en los extremos con cinta adhesiva porosa de papel.

Procedimiento experimental

Para evaluar los dos diferentes sistemas de doble cubierta se siguió un proceso de registro, procesamiento y análisis de la información, que se explica a continuación:

- 1.- Se tomaron 12 horas para la estabilización térmica (calibración) de los data loggers; colocados todos juntos dentro de un cuarto vacío y cerrado, programados para registrar datos cada 30 minutos. La información fue descargada y analizada en busca de anomalías en las mediciones.
- 2.- Una vez iniciado el periodo establecido para la evaluación de los sistemas en curso, se colocaron en su sitio dentro y fuera de los ME los equipos EL-USB-2 y EL-USB-TC-LCD con sus respectivos sensores, programados para realizar un registro de la temperatura de bulbo seco (TA), de humedad relativa (HR) y de la temperatura de las superficies cada 30 minutos.
- 3.- La información registrada por los equipos fue descargada a través del software EasyLog USB versión 5.53 diariamente, para luego ser transcrita a tablas de Excel preparadas para calcular de manera automática, para cada periodo, los valores horarios promedios y los valores característicos (máximos, mínimos y promedios).
- 4.- Una vez obtenidos todos los datos se procedió a preparar los gráficos de curvas de temperaturas necesarios para el estudio y análisis de cada fase del experimento.
- 5.- Por último se llevó a cabo la evaluación de los experimentos en función de los objetivos específicos ya mencionados.
- 6.- Se realizaron las conclusiones respectivas para cada fase experimental.

Elementos de análisis

De acuerdo con los objetivos establecidos, el estudio se trata de caracterizar el comportamiento térmico del sistema de doble cubierta evaluado experimentalmente. La información numérica obtenida del monitoreo de las diferentes configuraciones de cubierta es utilizada para proceso de análisis. El proceso de caracterización de los casos estudiados tiene como propósito dar respuesta a las interrogantes de la investigación a partir de tres elementos de análisis que se detallan a continuación:

Temperaturas características:

Corresponden a la temperatura máxima (TMáx), temperatura mínima (TMín), temperatura media (Tm) y oscilación de la temperatura (Osc). El análisis comparativo de estos valores con los valores correspondientes a los tres módulos experimentales y el ambiente exterior, constituye la forma inicial de caracterizar el comportamiento térmico del sistema doble cubierta.

El sistema será eficiente en la medida que logre reducir sus temperaturas máximas, medias y mínimas en relación con las temperaturas del módulo de control, cuanto mayor sean estas diferencias mayor será la eficiencia del sistema. Por lo tanto el objetivo que se persigue es que la temperatura media de la superficie interior de la losa en los módulos experimentales sea inferior a la observada en el módulo de control.

También es importante lograr la menor oscilación de temperatura posible al interior del módulo experimental, cuanto menor sea el factor decremento y mayor la diferencia entre las temperaturas medias internas entre los dos módulos experimentales y el de control, entonces mejor será el comportamiento térmico del sistema.

Confort térmico:

Otro elemento de evaluación del comportamiento térmico del sistema en estudio se realiza mediante el análisis de las condiciones de confort térmico que puede proporcionar. El rango de confort térmico ha sido definido de distintas maneras por diversos autores, en este estudio se utiliza el propuesto en la norma ANSI/ASHRAE Standard 55 para determinar la temperatura de confort (TC) que servirá para establecer el porcentaje de tiempo en que se logran condiciones de confort térmico en cada periodo de estudio.

El Standard 55 propone un método para determinar el rango de confort de acuerdo con la temperatura media mensual del ambiente exterior, basado en el enfoque adaptativo, para edificios ventilados naturalmente. La temperatura de confort es determinada mediante la siguiente ecuación:

$$TC = 17.8 + 0.31 (TA)$$

Dónde: TC= Temperatura de confort

TA= Temperatura media mensual

De acuerdo con ANSI/ASHRAE, la amplitud de la Zona de Confort (ZC) se determina estadísticamente a partir de estudios sobre la sensación térmica según el enfoque adaptativo, donde se establecen valores para 80% y 90% de confianza estadística, así se determinan los valores aceptados de ± 2.5 ó ± 3.0 K como rango aceptable de confort.

En Puerto Vallarta la temperatura media anual es de 26.1°C con una oscilación de promedio anual de 14.7°C . La TC calculada es de 25.8°C y la amplitud de la zona de confort se obtiene partir de $\pm 3.0^{\circ}\text{C}$ de la TC, es decir la ZC se establece entre los 22.8°C y los 28.8°C .

Para los dos periodos de estudio se calcula en:

- Invierno: TC= 24.9°C , ZC entre 21.9°C y 27.9°C .
- Primavera: TC= 25.9°C , ZC entre 22.9°C y 28.9°C .

Temperatura de la superficie interior del techo:

Después de la temperatura del aire, el factor físico más importante es el promedio de temperaturas de las superficies que lo rodean, dependiendo de la distancia y la diferencias de temperatura entre los cuerpos, más o menos calor será cedido o recibido en una u otra dirección, este proceso afecta el balance de energía en el cuerpo (Escobar, 2013).

Cuando las diferencias entre la temperatura del aire y la de radiación son amplias, ya sea entre temperatura del aire y de radiación, o bien entre diferentes temperaturas de radiación en un mismo espacio, pueden generar sensación de discomfort.

Koenigsberger y Lynn (1974, citados por Guerrero, 2011) establecen que en climas cálido húmedos, para obtener un flujo de calor admisible y propiciar condiciones adecuadas de confort térmico, la temperatura del techo no debe exceder la temperatura del aire por más de 4K. Al interesar a este estudio únicamente la diferencia numérica, se establece que el incremento en la temperatura de la superficie interior del techo respecto a la temperatura ambiente no debe ser mayor a 4°C , calculado mediante la ecuación:

$$\Delta T = T_{si} - T_A$$

Dónde: T_A = Temperatura ambiente

T_{si} = Temperatura superficial interior

El comportamiento térmico del sistema será adecuado siempre que se cumpla la condición: $\Delta T < 4^{\circ}\text{C}$.

Descripción de experimentos

Fase Uno: Selección del color de la superficie del techo

A cada uno de los tres módulos experimentales (ME) les fue pintada la superficie exterior de la losa con pintura vinil-acrítica de color blanco, terracota y plata (Figura 36), se instalaron en cada módulo dos equipos EL-USB-TC-LCD con sus respectivos termopares, uno en el centro de la superficie interior de la losa y otro en la exterior en forma paralela, se registraron los datos de temperatura cada 30 minutos durante tres días con la finalidad de caracterizar el comportamiento térmico de las superficiales externas e internas de la losa de concreto según el color de su superficie expuesta al Sol.



Figura 36. Módulos ME1, ME2 y ME3 durante la Fase Uno.

Paralelamente, para medir las condiciones medioambientales durante ésta y las subsecuentes fases experimentales, se utilizó un data logger modelo EL-USB-2 programado para registrar datos cada 30 minutos, ubicado cerca de los ME (radio no mayor a 4.00 metros) dentro de una caja de MDF color blanco de 15x15x20cm con ranuras de 3 cm a lo largo de sus caras verticales, como la que se muestra en la Figura 37.



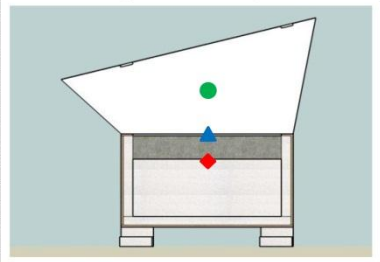
Figura 37. Caja de data logger para registro de las condiciones medioambientales.

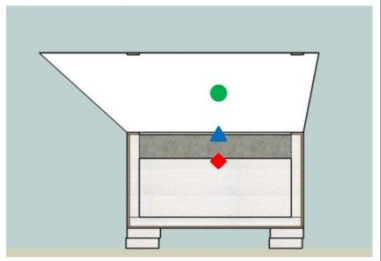
Fase Dos: Evaluación del sistema de doble cubierta en invierno

Con los datos obtenidos de la Fase Uno, se eligió el color que más contribuyó a la reducción de la temperatura de la superficie interna de la losa, y se pintaron todos los módulos de la misma manera. Posteriormente a los módulos ME1 y ME2 se les colocó la segunda cubierta, y el ME3 se utilizó como módulo de control.

Al igual que en la Fase Uno, a los ME se les colocaron data loggers EL-USB-TC-LCD con sus termopares en la cara externa e interna de la losa de concreto, y un EL-USB-2 en el centro del espacio ventilado entre la cubierta de lámina y la losa, de la misma forma el registro de datos se hizo cada 30 minutos, a lo largo de 15 días durante el mes de febrero. Al mismo tiempo se midieron y registraron las condiciones medioambientales también cada 30 minutos.

La Figura 38 muestra las hojas de registro del experimento durante la Fase Dos, en donde se indica el número, modelo y localización en el módulo de cada uno de los data loggers, así como las fechas y horarios durante los que se llevaron a cabo las mediciones.

Fase 2 - Monitoreo invierno						
Módulo	ME1 - Doble cubierta con inclinación Sur					
No.de Data Logger	ME1-1	◆	ME1-2	▲	ME1-3	●
Modelo	EL-USB-TC-LCD		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-2	
Ubicación	Superficie interior		Superficie exterior		Espacio ventilado	
Fecha Inicial	12-feb					
Hora inicial	07:00					
Fecha Final	27-feb					
Hora Final	06:30					
Amanecer	07:34					
Mediodía	13:16					
Ocaso	18:59					
Anochece	19:21					

Fase 2 - Monitoreo invierno						
Módulo	ME2 - Doble cubierta horizontal					
No.de Data Logger	ME2-1	◆	ME2-2	▲	ME2-3	●
Modelo	EL-USB-TC-LCD		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-2	
Ubicación	Superficie interior		Superficie exterior		Espacio ventilado	
Fecha Inicial	12-feb					
Hora inicial	07:00					
Fecha Final	27-feb					
Hora Final	06:30					
Amanecer	07:34					
Mediodía	13:16					
Ocaso	18:59					
Anochece	19:21					

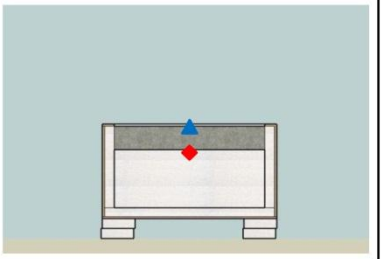
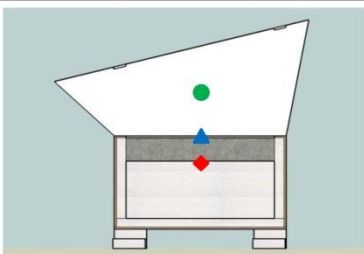
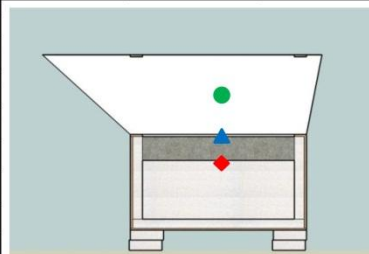
Fase 2 - Monitoreo invierno						
Módulo	ME3 - Control					
No.de Data Logger	ME3-1	◆	ME3-2	▲		
Modelo	EL-USB-TC-LCD		EL-USB-TC-LCD			
Ubicación	Superficie interior		Superficie exterior			
Fecha Inicial	12-feb					
Hora inicial	07:00					
Fecha Final	27-feb					
Hora Final	06:30					
Amanecer	07:34					
Mediodía	13:16					
Ocaso	18:59					
Anochece	19:21					

Figura 38. Hoja de registro del experimento durante la Fase Dos.

Fase Tres: Evaluación del sistema de doble cubierta en primavera

Se llevó a cabo el mismo procedimiento de la Fase Dos, se colocaron termopares de los data loggers EL-USB-TC-LCD paralelamente en la cara externa e interna de la losa de concreto, y un modelo EL-USB-2 en el centro del espacio ventilado, todos los data loggers se programaron para registrar los datos del comportamiento térmico de los tres ME cada 30 minutos durante 15 días del mes de mayo, la hoja de registro donde se indica la posición de cada data logger se expone en la Figura 39.

Fase 3 - Monitoreo primavera							
Módulo		ME1 - Doble cubierta con inclinación Sur					
No.de Data Logger		ME1-1	◆	ME1-2	▲	ME1-3	●
Modelo		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-2	
Ubicación		Superficie interior		Superficie exterior		Espacio ventilado	
Fecha Inicial	04-may						
Hora inicial	07:00						
Fecha Final	19-may						
Hora Final	06:30						
Amanecer	07:30						
Mediodía	13:58						
Ocaso	20:27						
Anochecer	20:51						

Fase 3 - Monitoreo primavera							
Módulo		ME2 - Doble cubierta horizontal					
No.de Data Logger		ME2-1	◆	ME2-2	▲	ME2-3	●
Modelo		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-2	
Ubicación		Superficie interior		Superficie exterior		Espacio ventilado	
Fecha Inicial	04-may						
Hora inicial	07:00						
Fecha Final	19-may						
Hora Final	06:30						
Amanecer	07:30						
Mediodía	13:58						
Ocaso	20:27						
Anochecer	20:51						

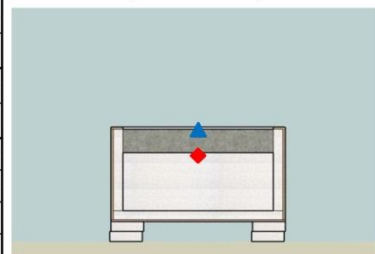
Fase 3 - Monitoreo primavera							
Módulo		ME3 - Control					
No.de Data Logger		ME3-1	◆	ME3-2	▲		
Modelo		EL-USB-TC-LCD		EL-USB-TC-LCD			
Ubicación		Superficie interior		Superficie exterior			
Fecha Inicial	04-may						
Hora inicial	07:00						
Fecha Final	19-may						
Hora Final	06:30						
Amanecer	07:30						
Mediodía	13:58						
Ocaso	20:27						
Anochecer	20:51						

Figura 39. Hoja de registro del experimento durante la Fase Tres.

Los módulos experimentales fueron dispuestos de forma en que todos estuvieran bajo las mismas condiciones de soleamiento durante todo el día, y a una distancia de no más de 4 metros de la caja ranurada con el data logger utilizado para el registro de las condiciones medio ambientales (Figura 40).



Figura 40. Disposición de módulos experimentales para el desarrollo del experimento.

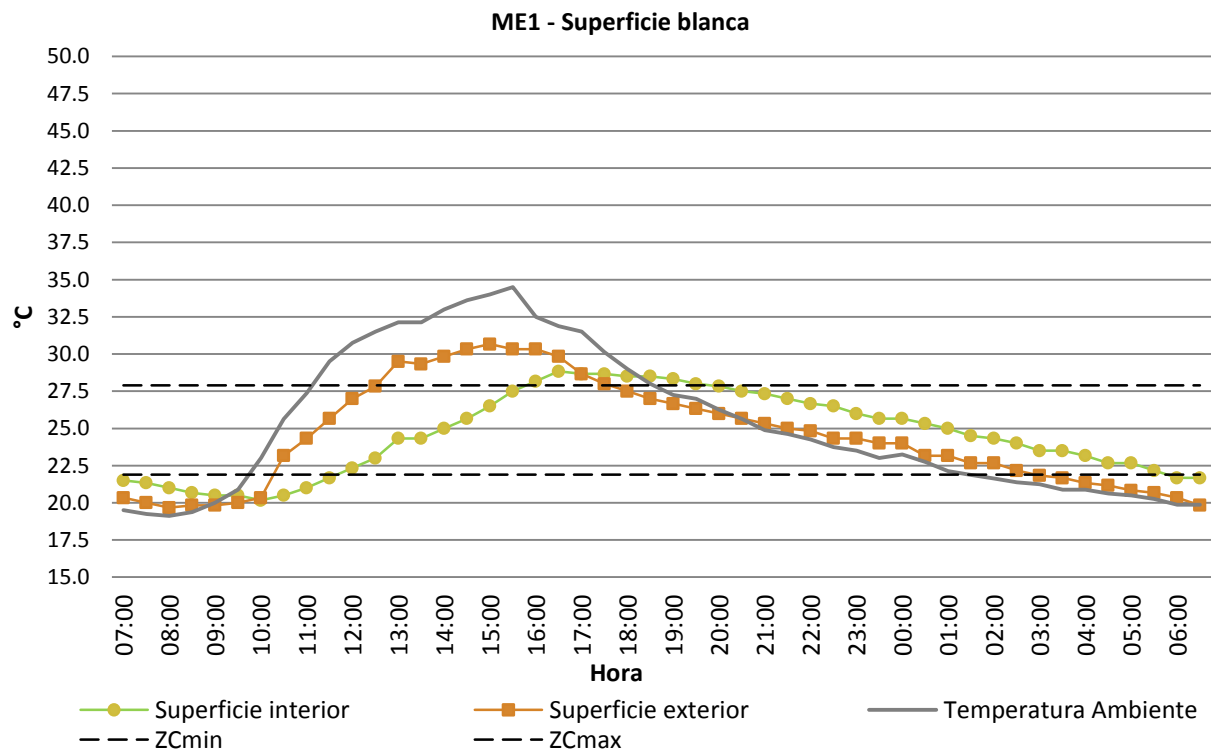
Análisis de resultados

Temperaturas Características y Confort térmico

Fase Uno

La Gráfica 7 muestra el resultado del monitoreo de las temperaturas superficiales interior y exterior de la losa de concreto en el módulo ME1, se presentan los valores promedio diarios para ser comparados con la temperatura ambiente y el rango confort para el mes de febrero.

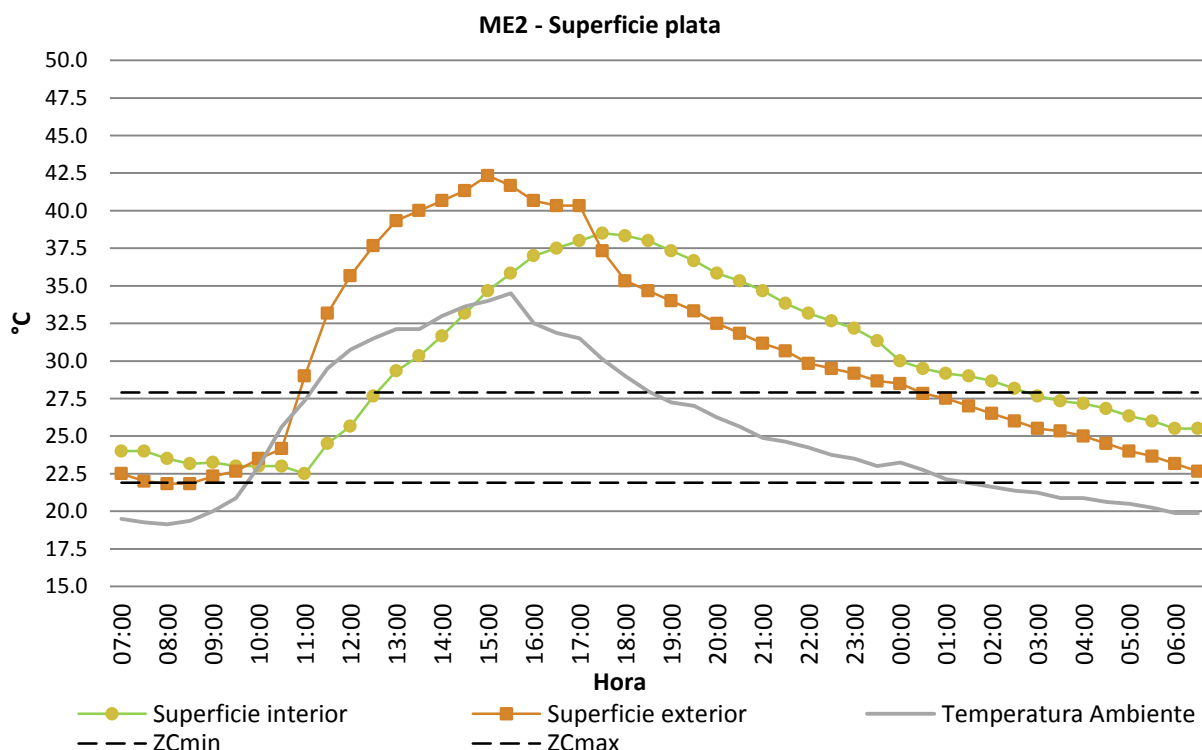
El valor máximo alcanzado por la superficie exterior es de 30.7°C a las 15:00 horas, a esa misma hora la superficie interior tenía una temperatura de 26.6°C, ambas temperaturas están por debajo de la temperatura ambiente que alcanzó un máximo de 34.5°C. Entre las 10:00 y las 17:00 horas, periodo del día donde se recibe más radiación solar, la diferencia entre la temperatura de la superficie interior y la exterior es en promedio de 4°C, y entre la temperatura ambiente y la superficie interior la diferencia llegó a ser de hasta 8°C. Sin embargo, después de la puesta del Sol, alrededor de las 19:00 horas, y durante toda la noche la temperatura de la superficie interior se mantiene en promedio 2°C por encima de la temperatura ambiente, condición que no rebasa, e incluso llega a estar por debajo, de la zona de confort.



Gráfica 7. Resultados del monitoreo de temperatura del ME1.

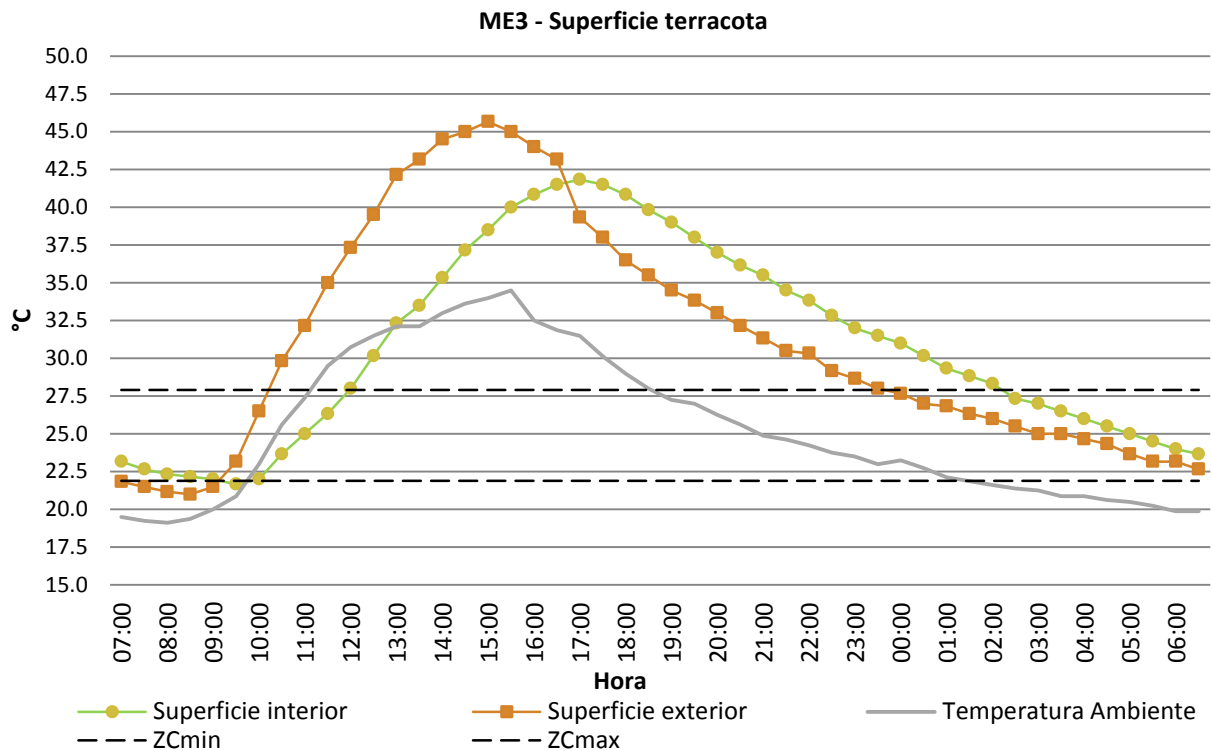
Los resultados que arrojó el monitoreo del módulo ME2 (Gráfica 8), con la superficie exterior en color plata, muestran que ésta alcanzó un promedio máximo de 42.3°C a las 15:00 horas, en ese mismo

periodo la superficie interior llegó a los 34.7°C, rebasando la temperatura ambiente, y alcanzó su valor máximo promedio de 37.3°C a las 17:30 horas, 9.3°C por encima del límite superior de la zona de confort. Durante toda la noche la superficie interior mantiene una temperatura por encima de la temperatura ambiente, con diferencias de hasta 9.6°C.



Gráfica 8. Resultados del monitoreo de temperatura en el ME2.

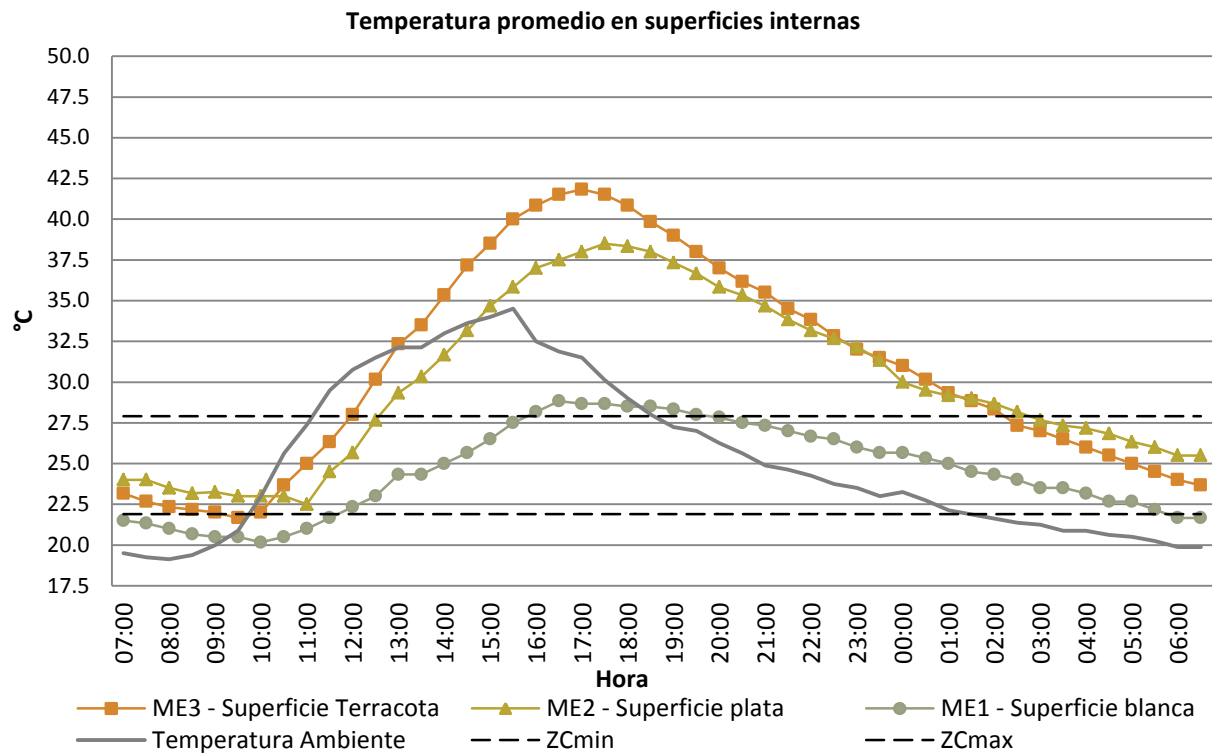
En el módulo ME3 (Gráfica 9), la superficie exterior registró una temperatura promedio máxima de 45.7°C a las 15:00 horas, 11.7°C por encima de la temperatura ambiente; a esa misma hora la superficie interior registró 38.5°C. La superficie interior alcanzó su temperatura máxima promedio de 41.8°C a las 17:00 horas y comenzó un descenso que alcanzó el límite superior de la zona de confort hasta las 2:00 horas. Entre las 10:00 y las 17:00 la temperatura de la superficie exterior está siempre por encima de la temperatura de la superficie al interior con diferencias de hasta 10.1°C. La temperatura de la superficie interior rebasa la temperatura ambiente a partir de las 15:00 horas, llegando a tener una diferencia de hasta 9.9°C.



La Gráfica 10 presenta el resultado del promedio de temperaturas registradas en la superficie interna de la losa en cada uno de los ME, en donde es notorio el contraste entre la temperatura de la losa con superficie blanca, con un máximo promedio de 28.8°C, y la losa con superficie terracota, que alcanzó los 41.8°C, esto representa una diferencia de 13°C. La superficie interna de la losa en color plata alcanzó un máximo de 38.5°C, valor 9.7°C más alto que en la losa en color blanco.

El resultado del monitoreo de temperaturas en el módulo ME1 expone que la superficie interna de la losa registró una oscilación promedio diaria de 8.7°C, y la superficie exterior de 11.0°C. Para el módulo ME2 con la superficie expuesta al Sol en color plata, la oscilación promedio fue de 16.0°C al interior y de 20.5°C al exterior. Para el módulo ME3 con la superficie exterior de color terracota, la oscilación en la temperatura de ésta fue en promedio de 24.7°C y para la superficie interior fue de 20.2°C.

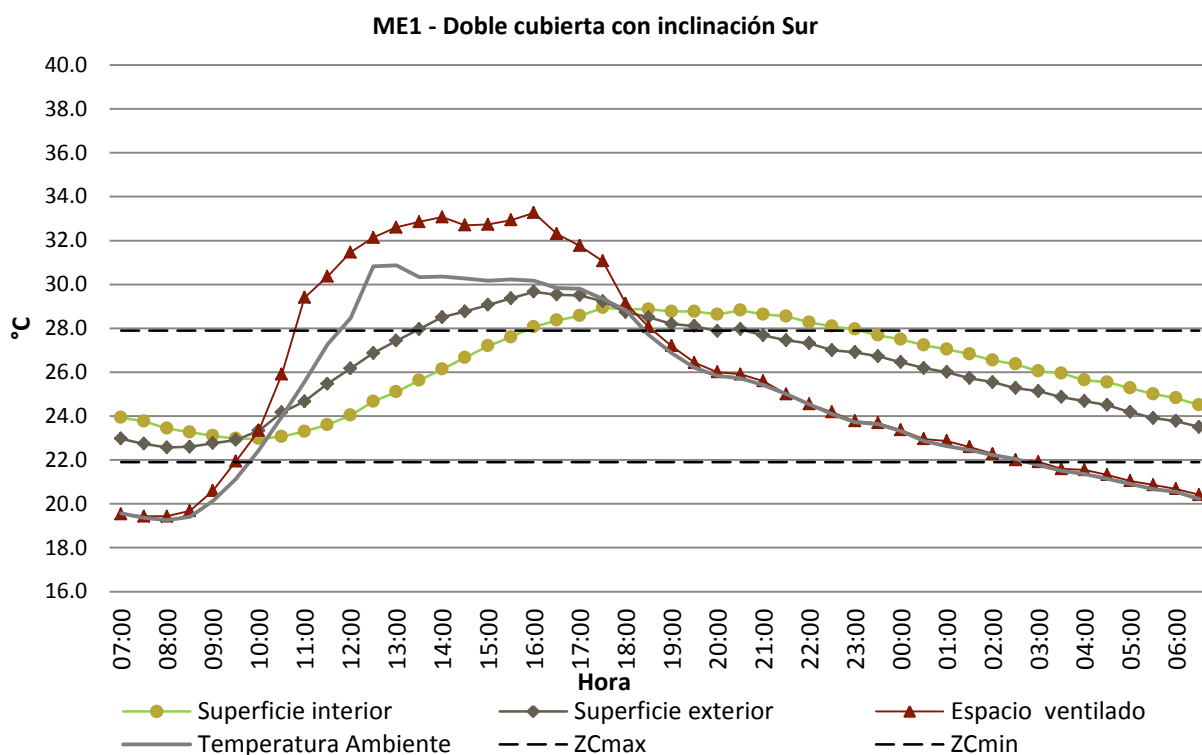
Los módulos ME2 y ME3, tienen una oscilación promedio mayor que la de la temperatura ambiente y sus superficies presentaron temperaturas más altas que las registradas en el ambiente, con diferencias de hasta 10.1°C en el módulo ME2 y 11.8°C en el módulo ME3. La oscilación promedio de la temperatura ambiente fue de 15.4°C, al comparar estos resultados se observa que el ME1, con la superficie externa en color blanco, fue el único en el que se presenta una reducción de la oscilación de la temperatura, y además destaca que los valores promedio horarios durante el día no rebasan la temperatura ambiente.



Fase Dos

La Gráfica 11 muestra los resultados del monitoreo de temperatura en el módulo ME1 durante la Fase Dos. Se registraron datos de la temperatura superficial interior y exterior de la losa, así como de la temperatura y humedad en el espacio ventilado ubicado entre ésta y la segunda cubierta de lámina metálica, además de la temperatura ambiente y humedad relativa cada 30 minutos durante 15 días de invierno y posteriormente se calcularon los valores promedio horarios.

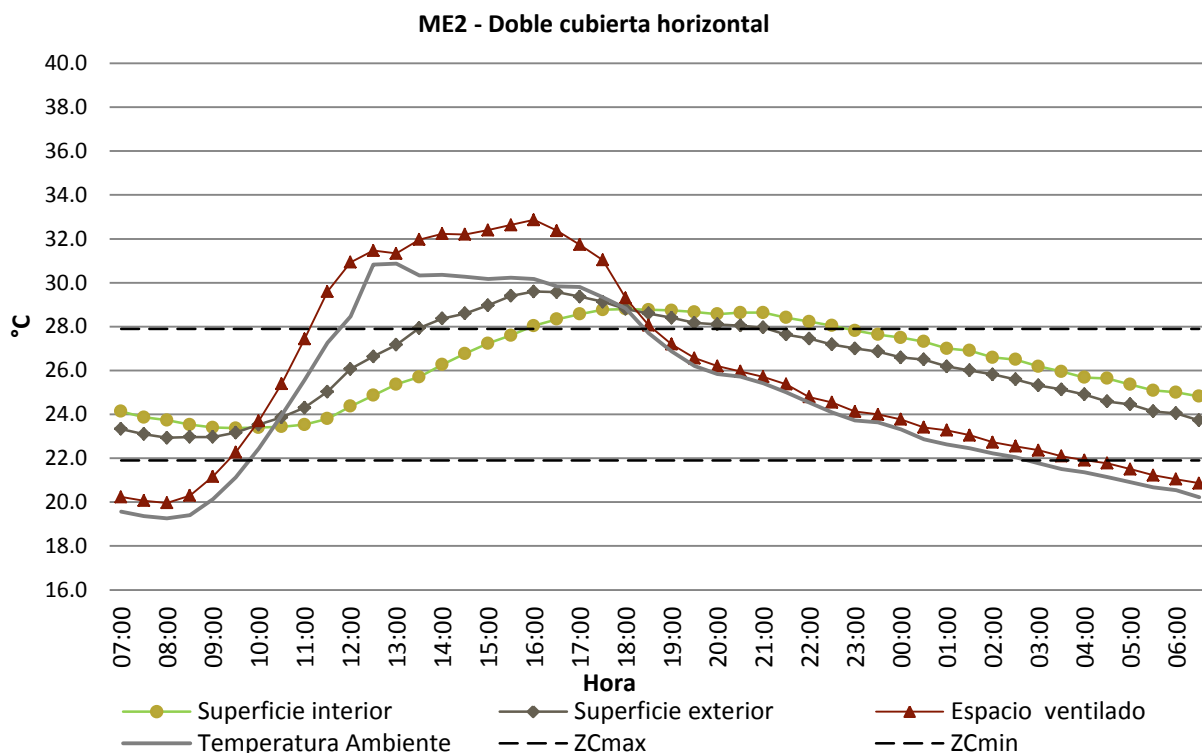
Se observa que en el ME1, entre las 10:00 y las 17:00 horas la temperatura interna de la losa es inferior a la temperatura ambiente, aunque el espacio ventilado registró temperaturas de hasta 33.3°C. La temperatura máxima alcanzada por la superficie externa de la losa fue de 29.7°C a las 16:00, a esa misma hora la superficie interna registró 28.1°C, temperatura dentro del límite superior de la zona de confort. Después de las 18:00 comienza el descenso de la temperatura, sin embargo la superficie interna de la losa registró temperaturas en promedio 4°C más altas que la temperatura del ambiente y la del espacio ventilado, pero aún dentro de la zona de confort.



Gráfica 11. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME1 durante la Fase Dos.

Los resultados obtenidos de las mediciones en el módulo ME2, donde la segunda cubierta se encontraba en posición horizontal, se presentan en la Gráfica 12. Se observa un comportamiento de las temperaturas muy similar al registrado en el ME1, pero con menor diferencia entre la temperatura de la superficie

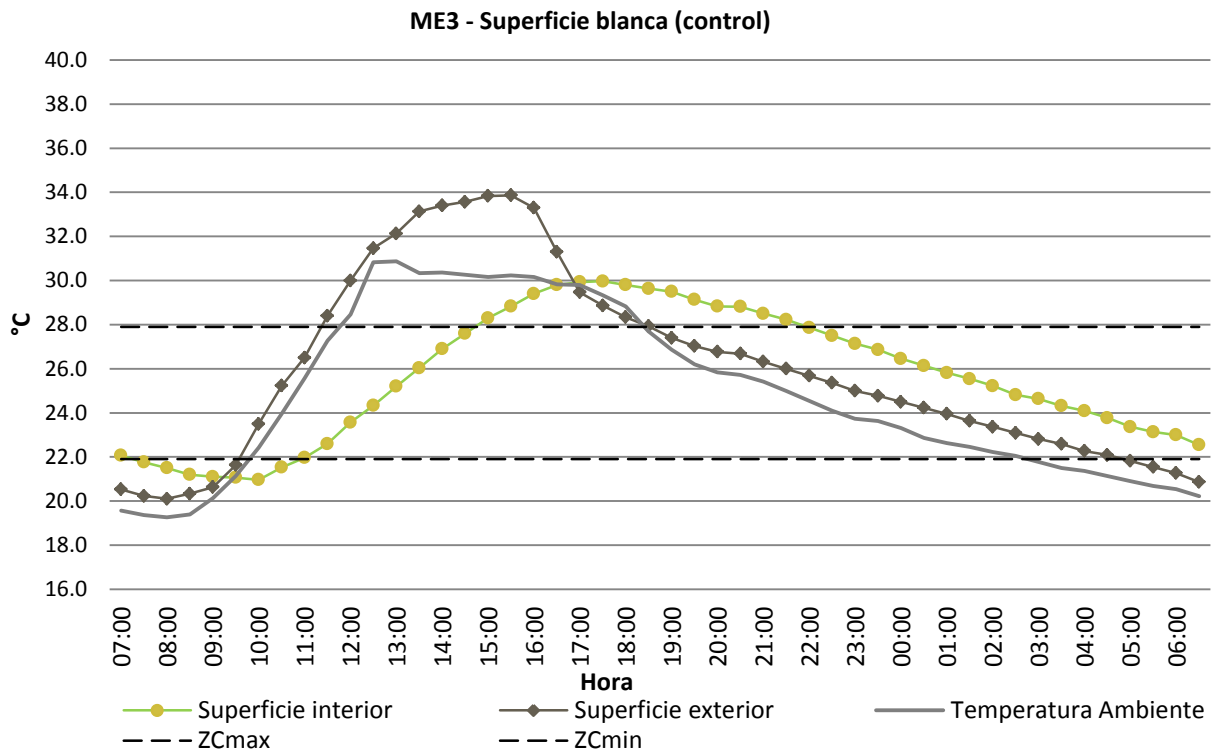
exterior e interior de la losa, las temperaturas máximas que alcanzaron fueron a las 16:00 horas, de 30.2°C al exterior y 28.1°C al interior.



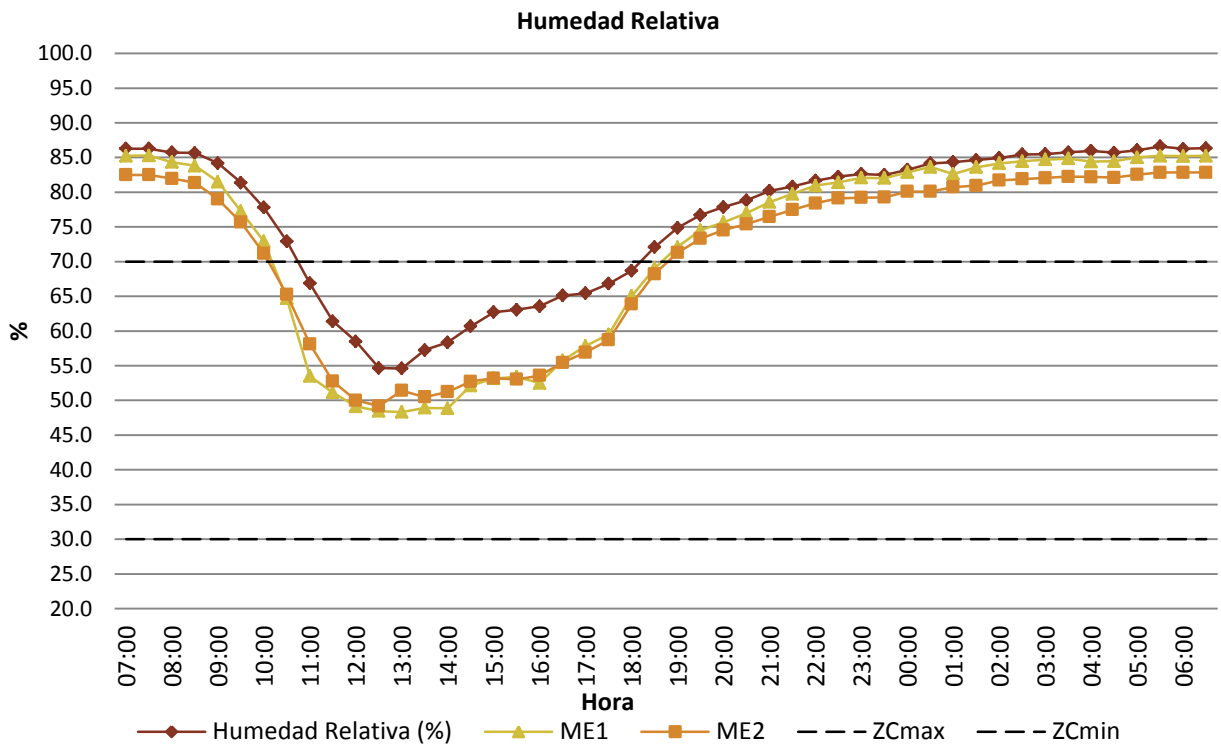
Gráfica 12. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME2 durante la Fase Dos.

El ME3 se utilizó como módulo de control y fue monitoreado para comparar su comportamiento térmico con el ME1 y ME2. La Gráfica 13 exhibe las temperaturas promedio horarias registradas, donde es notoria la diferencia entre la temperatura ambiente y la superficie externa de la losa entre las 12:30 y las 17:00 horas, que es de hasta 3.7°C. La temperatura de la superficie interna de la losa rebasa apenas el límite superior de la zona de confort entre las 15:30 y las 21:00 horas, alcanzando un máximo de 28.8°C, y después de las 18:00 horas se mantiene por encima de la temperatura ambiente durante toda la noche, con una diferencia de hasta 4.5°C, pero dentro de la zona de confort.

También fue monitoreada la humedad relativa (HR) del ambiente y dentro del espacio ventilado en el ME1 y ME2, los resultados de los porcentajes promedios horarios se muestran en la Gráfica 14, la HR ambiente oscila entre el 86.6% y el 54.6%, mientras que en el espacio ventilado en el ME1 alcanzó un porcentaje máximo de 85.3% y mínimo de 48.3%, y en el ME2 se encuentra entre el 82.9% y 49.2%. Se observa la reducción significativa de la HR dentro del espacio ventilado en ambos ME durante las horas donde hay radiación solar, entre las 7:00 y las 19:00 horas.



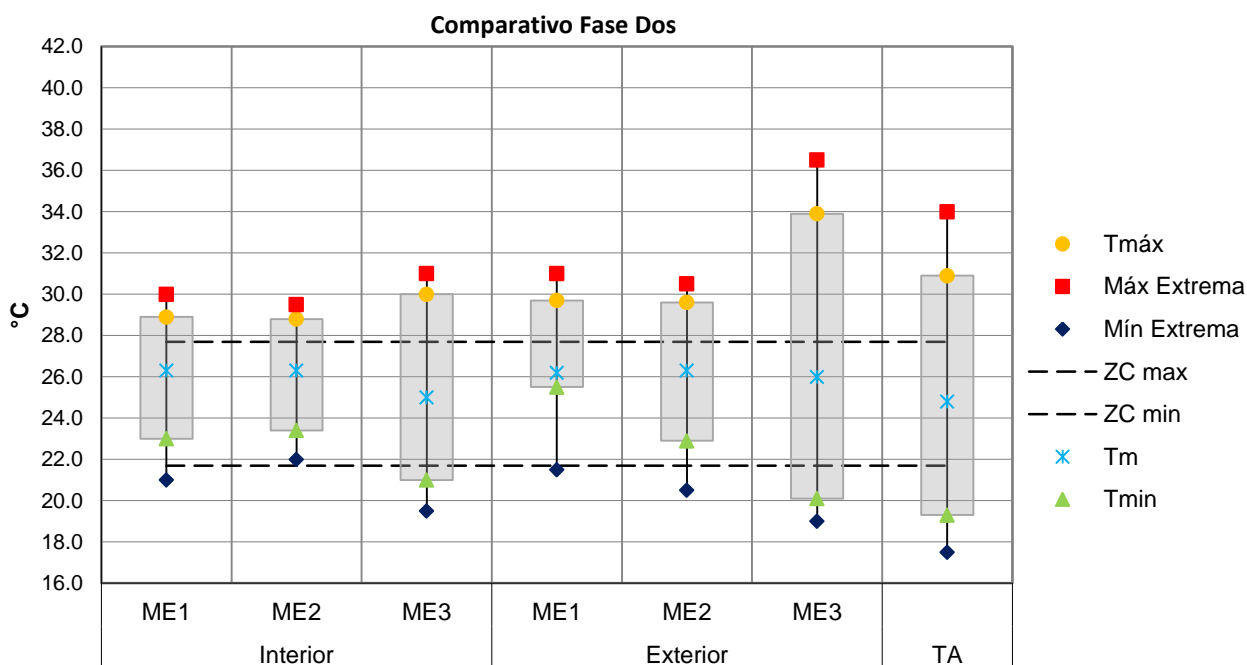
Gráfica 13. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME3 durante la Fase Dos.



Gráfica 14. Humedad Relativa promedio horaria durante la Fase Dos.

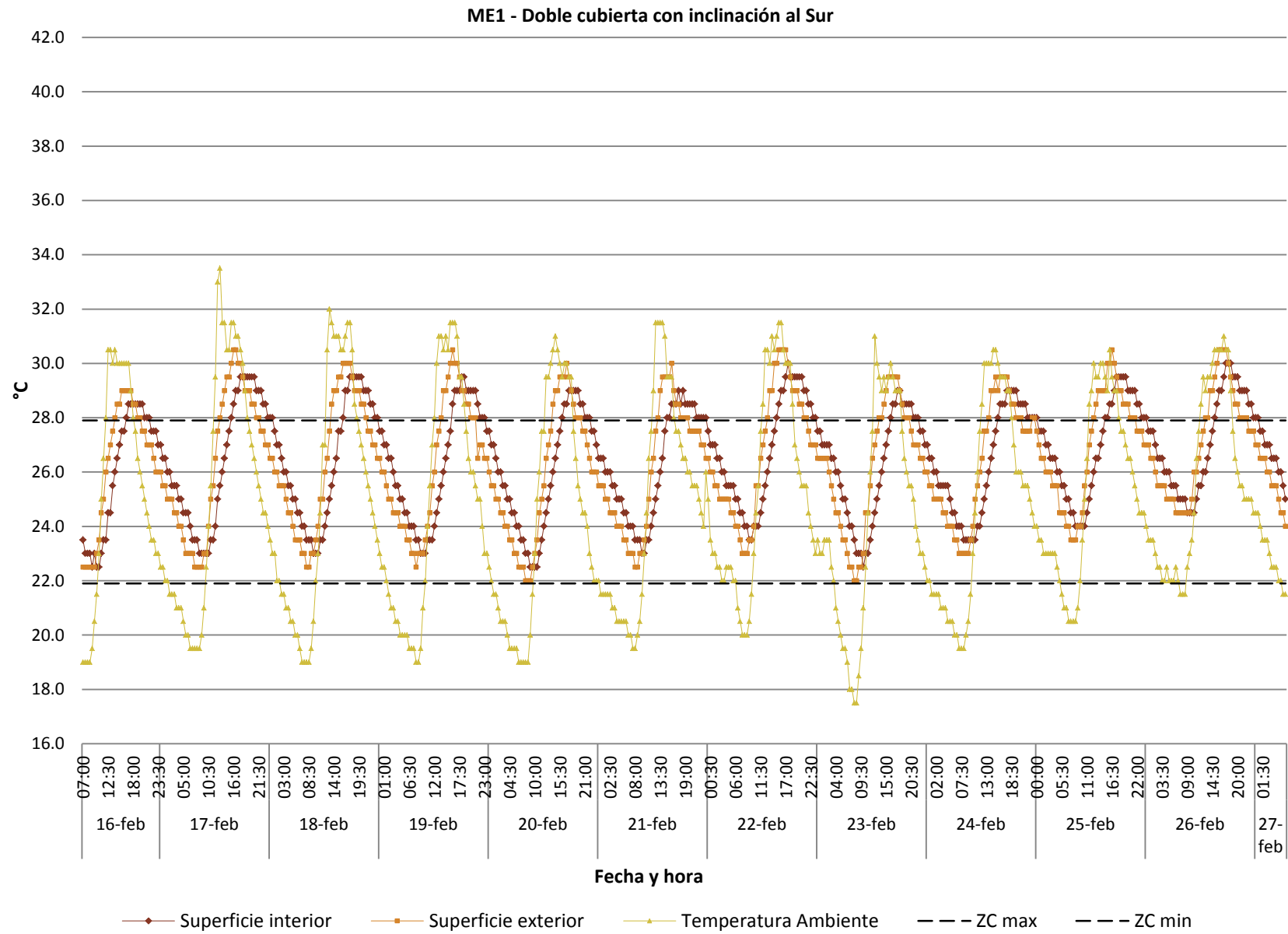
Las gráficas anteriores representan los resultados promedio horarios de las temperaturas registradas en las superficies de las losas, es notoria la reducción de la oscilación de la temperatura en las superficies de las losas en los ME que cuentan con segunda cubierta respecto al módulo de control. La oscilación promedio de la temperatura de la superficie interna en el ME1 fue de 6.0°C y en el ME2 de 5.4°C, mientras que en el módulo de control fue de 9.0°C.

La Gráfica 15 es una comparativa del comportamiento térmico de los tres ME durante la Fase Dos, se observa que la diferencia de temperaturas que se presentaron en la superficie interna de las losas en el ME1 y ME2 es mínima, aunque en ambas la oscilación es menor que en el ME3. En cambio, la temperatura de la superficie externa de la losa en el ME1 es notoriamente menor que en el ME2 y ésta a su vez es menor que la registrada en el ME3.

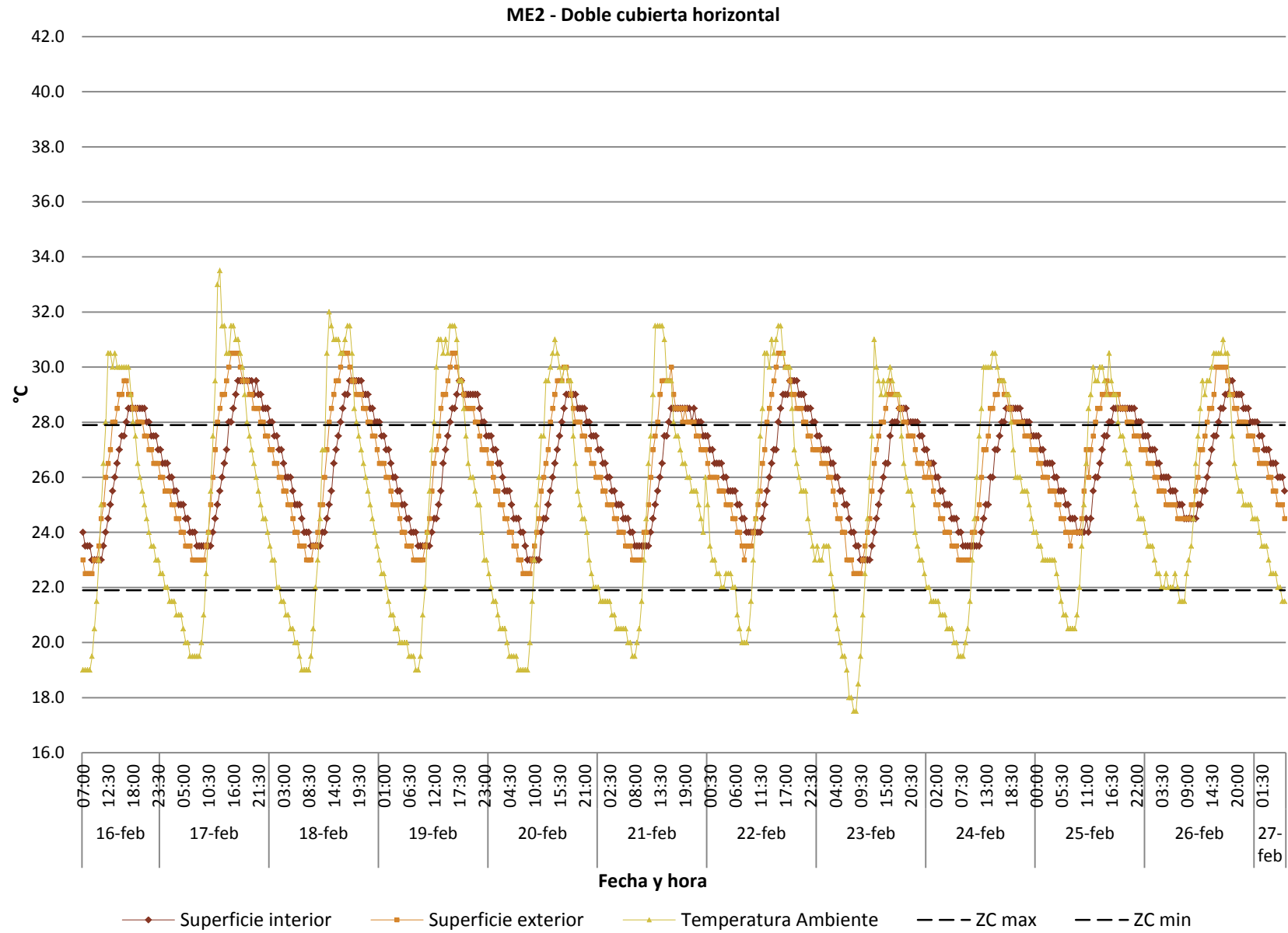


Gráfica 15. Gráfica comparativa de resultados obtenidos en la Fase Dos.

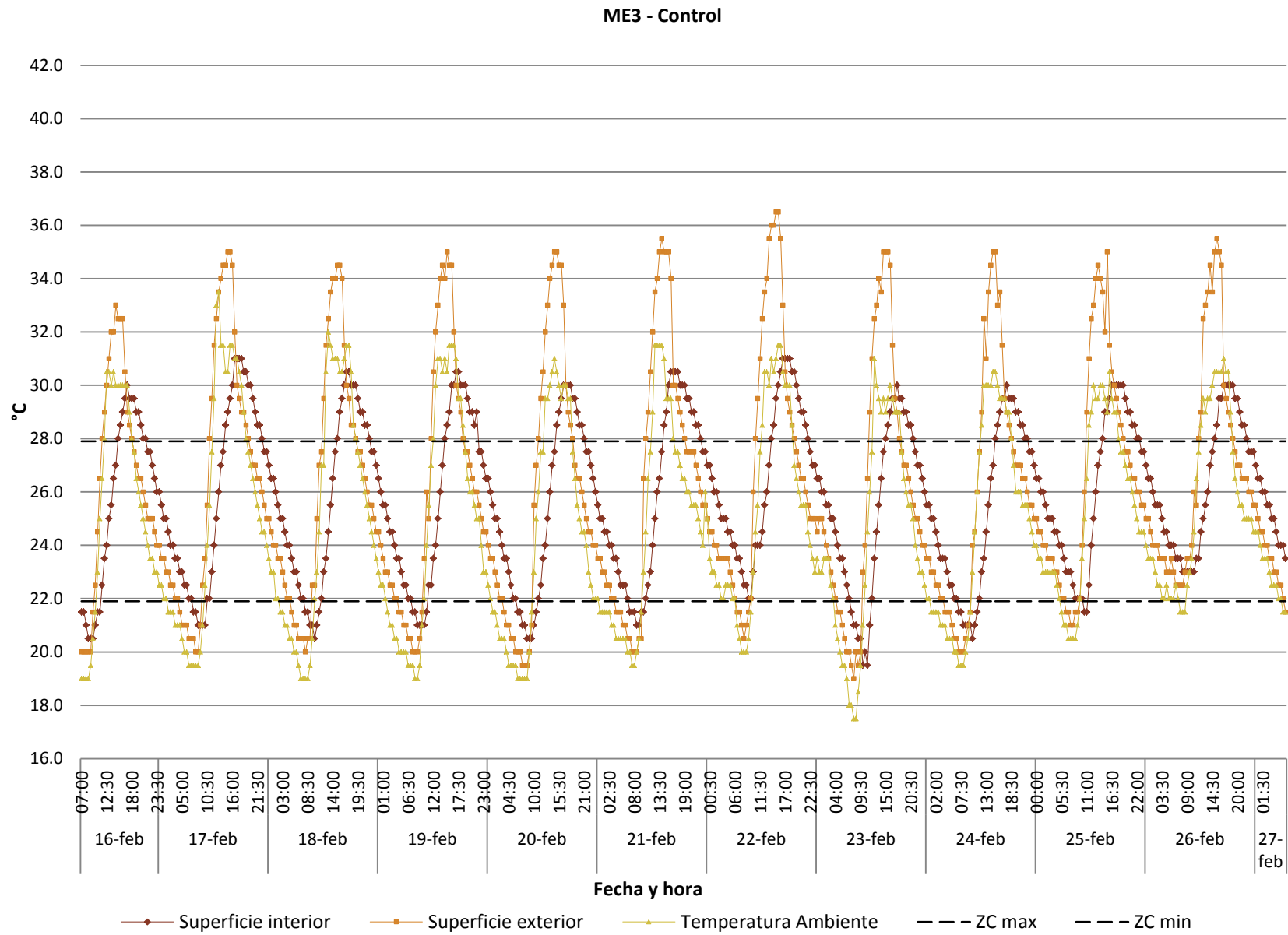
Las gráficas 16, 17 y 18 muestran las temperaturas horarias registradas en los módulos experimentales durante la Fase Dos a lo largo de 11 días. Como en las gráficas anteriores, es notoria la reducción de la variación de la temperatura en las superficies de las losas respecto a la temperatura ambiente en los módulos con doble cubierta (ME1 y ME2), sin embargo la diferencia de temperatura entre la superficie externa y la interna es mínima, aunque sí representan una mejora respecto a los datos obtenidos en el módulo de control (ME3).



Gráfica 16. Temperaturas horarias registradas en el ME1 durante la Fase Dos.



Gráfica 17. Temperaturas horarias registradas en el ME2 durante la Fase Dos.

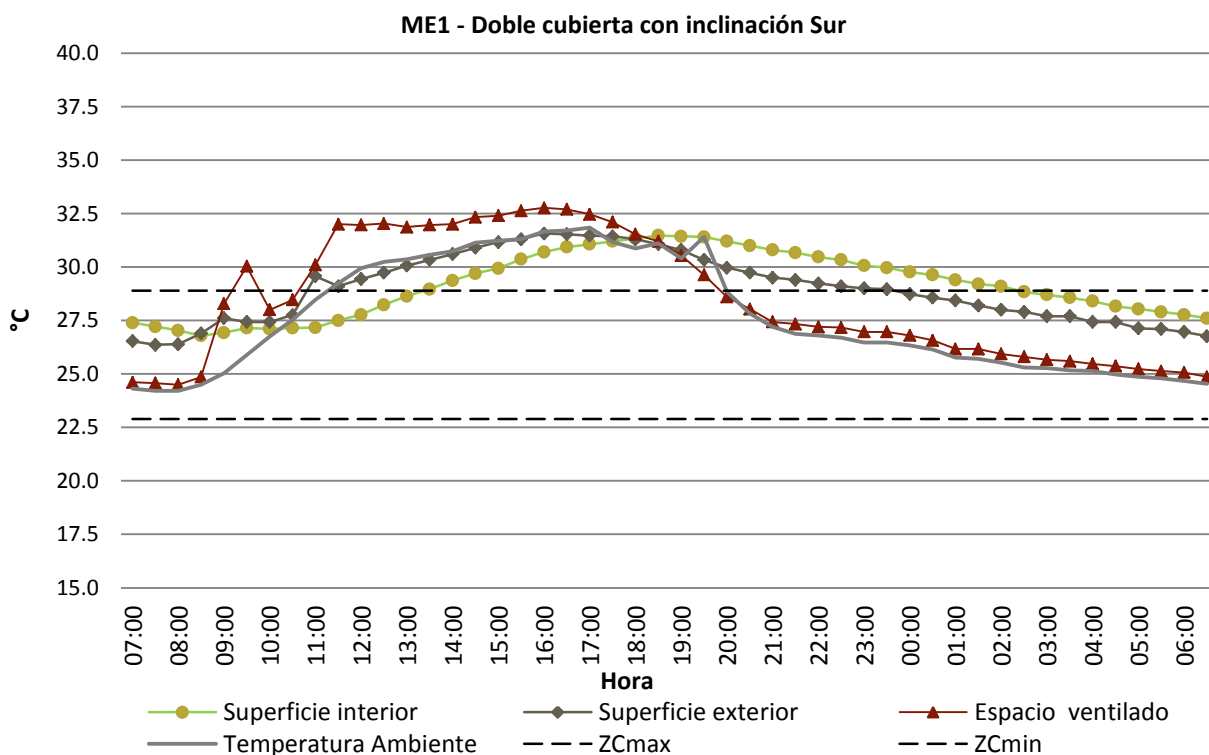


Gráfica 18. Temperaturas horarias registradas en el ME3 durante la Fase Dos.

Fase Tres

La Gráfica 19 muestra los resultados del monitoreo de temperatura en el módulo ME1 durante la Fase Tres. Fueron registrados los datos de la temperatura superficial interior y exterior de la losa, así como de la temperatura y humedad relativa dentro del espacio ventilado ubicado entre la losa y la segunda cubierta de lámina metálica, además se registraron la temperatura ambiente y humedad relativa cada 30 minutos durante 15 días de primavera y posteriormente se calcularon los valores promedio horarios para graficarlos y analizarlos.

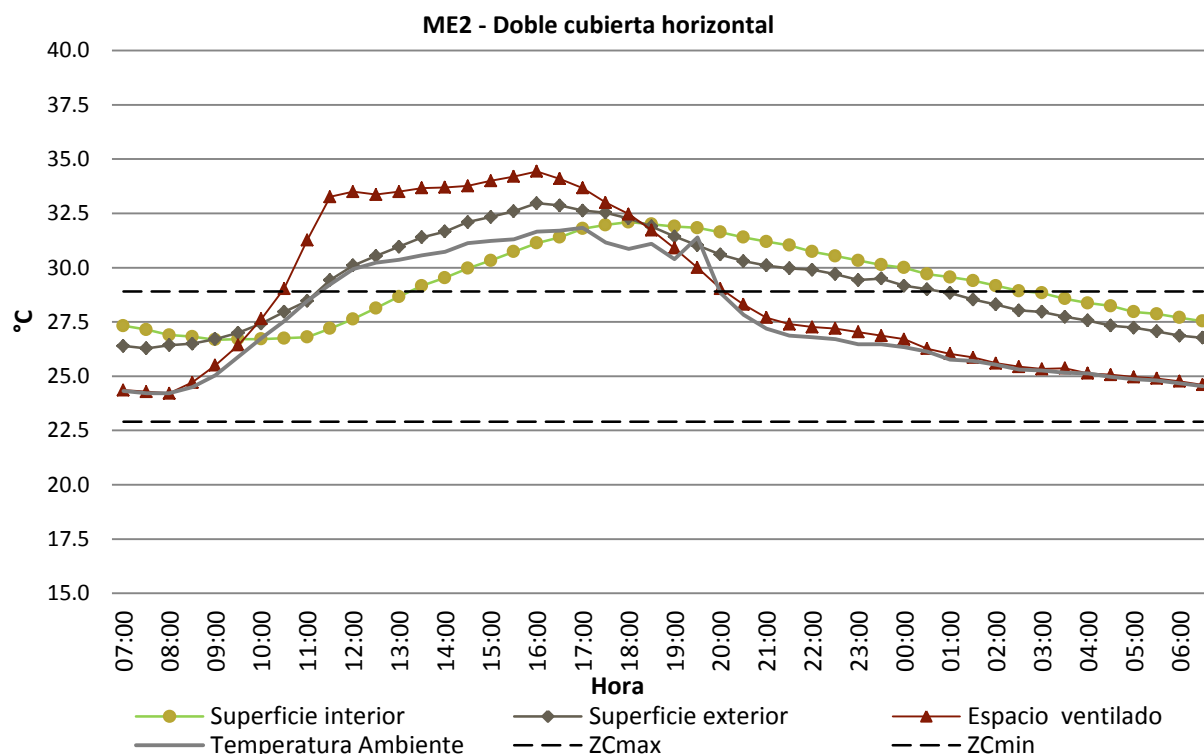
Se observa que en el ME1, entre las 10:30 y las 17:30 horas la temperatura de la losa es inferior a la temperatura ambiente que alcanzó un máximo de 31.8°C, el espacio ventilado registró temperaturas de hasta 32.8°C. La temperatura máxima alcanzada por la superficie externa de la losa fue de 31.7°C a las 16:00, a esa misma hora la superficie interna registró 30.7°C, temperatura que sale de la zona de confort. A partir de las 20:00 horas comienza el descenso de la temperatura ambiente, sin embargo la superficie interna de la losa registró temperaturas en promedio 3.5°C más altas que la temperatura del ambiente y la del espacio ventilado, pero dentro de la zona de confort.



Gráfica 19. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME1 durante la Fase Tres.

Los resultados del monitoreo del ME2 durante la Fase Tres se presentan en la Gráfica 20, en donde se observa un comportamiento de las temperaturas similar al registrado en el ME1, pero con mayor diferencia entre la temperatura de la superficie exterior e interior de la losa, la temperatura máxima que

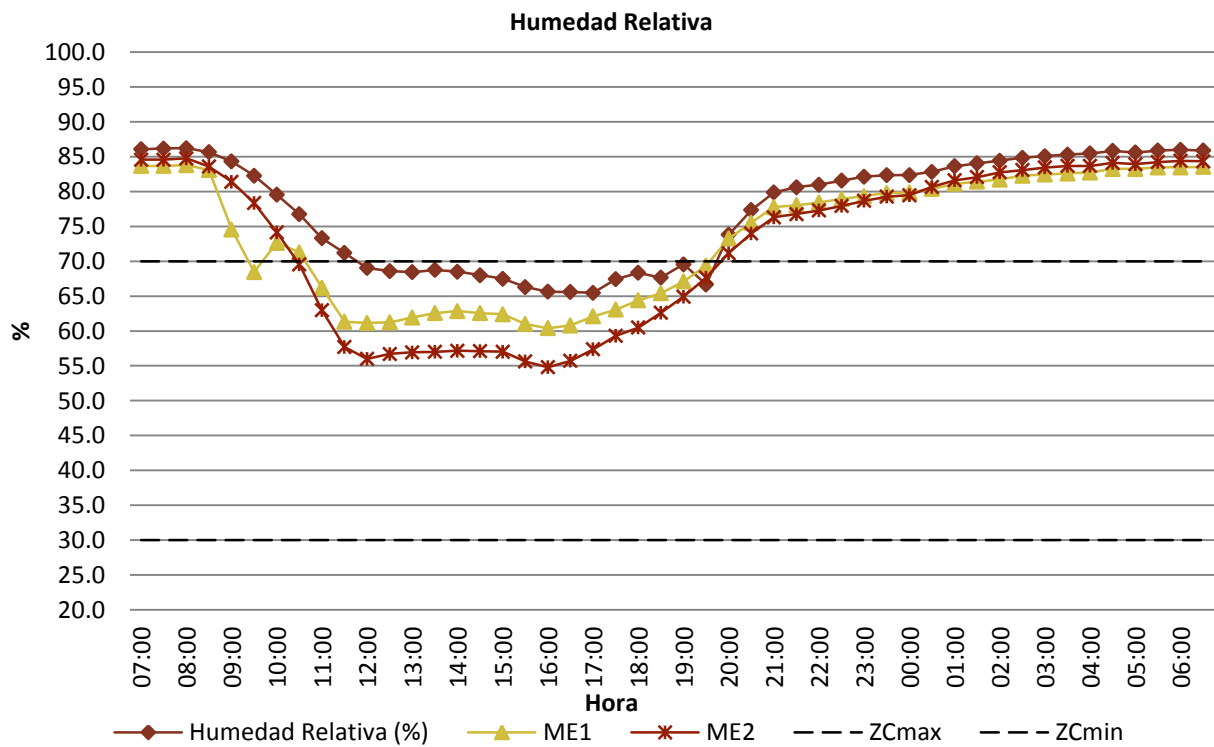
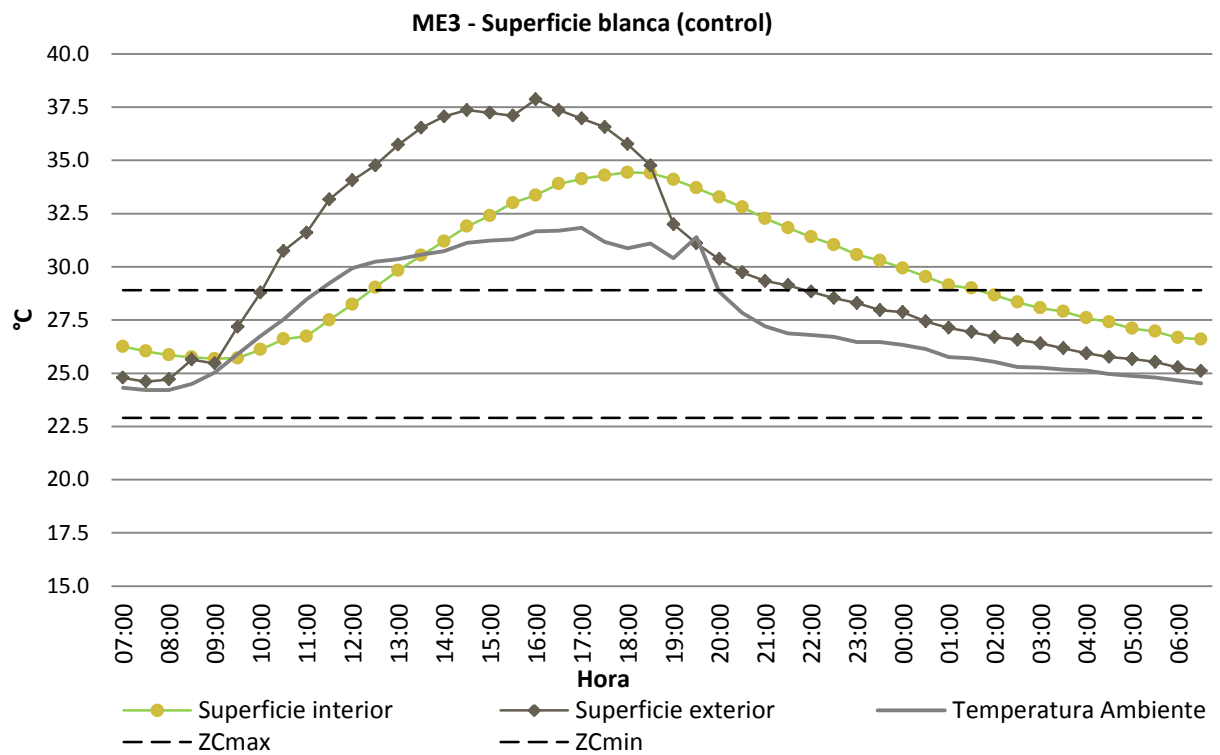
alcanzó la superficie externa fue de 33.0°C a las 16:00 horas, periodo durante el cual la superficie interna presentó 31.1°C. La superficie interior alcanzó un máximo de 32.1°C a las 18:00 horas y un mínimo de 26.7°C entre las 09:00 y las 10:00.



Gráfica 20. Temperaturas promedio horarias registradas en el módulo ME2 durante la Fase Tres.

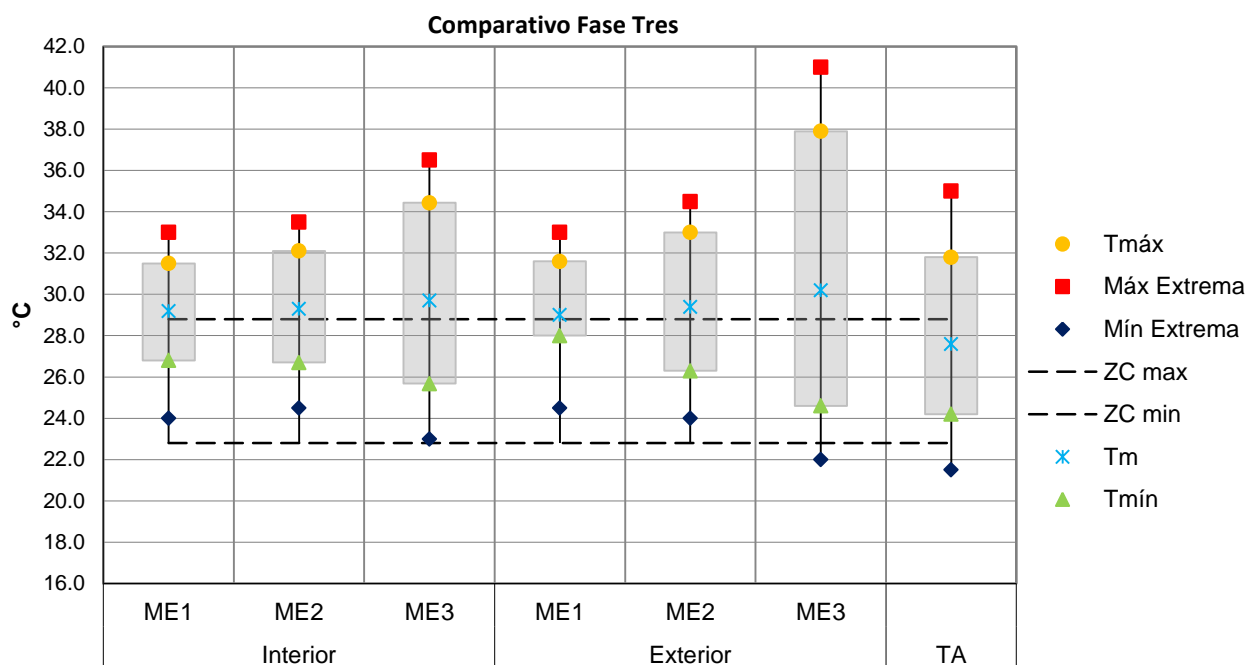
La Gráfica 21 presenta las temperaturas promedio horarias registradas en el ME3 que se utilizó como módulo de control, es notoria la diferencia entre la temperatura ambiente y la superficie externa de la losa entre las 9:00 y las 19:00 horas, que es de hasta 6.3°C. La temperatura de la superficie interna de la losa rebasa la zona de confort entre las 12:30 y las 01:30 horas, alcanzando un máximo de 34.4°C a las 18.00, y a partir de las 14:00 horas y durante toda la noche se mantiene por encima de la temperatura ambiente, con una diferencia promedio de hasta 3.9°C.

En la Gráfica 22 se muestran los resultados del monitoreo de la humedad relativa ambiente y dentro del espacio ventilado en el ME1 y ME2. El porcentaje promedio horario de HR ambiente oscila entre el 86.2% y el 65.5%, mientras que en el espacio ventilado en el ME1 alcanzó un porcentaje máximo de 83.5% y mínimo de 60.4%, y en el ME2 se encuentra entre el 84.8% y 54.8%. Al igual que en la Fase Dos se observa la reducción significativa de la HR dentro del espacio ventilado en ambos tanto en el ME1 como en el ME2 durante las horas donde hay radiación solar, entre las 7:30 y las 20:30 horas.



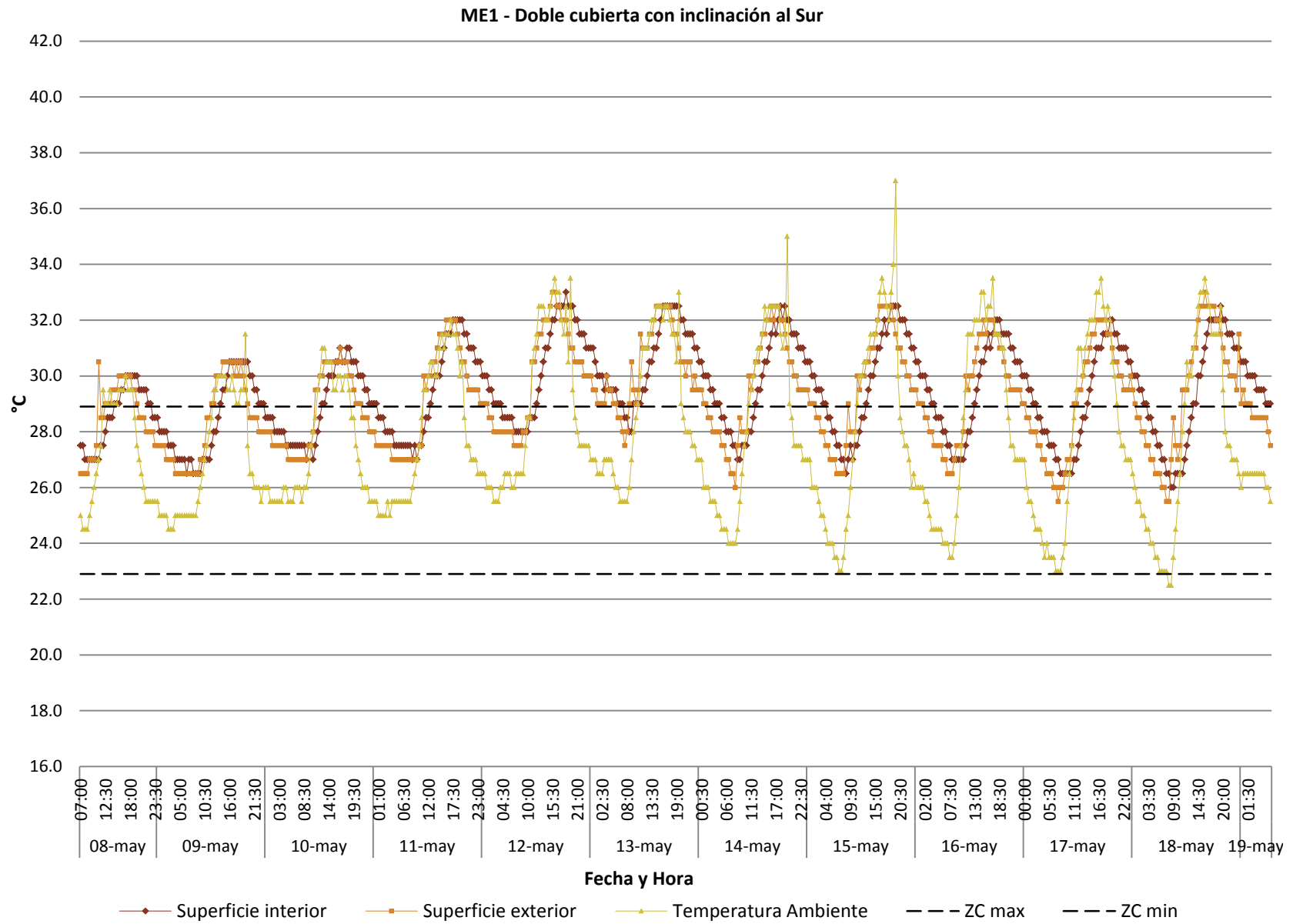
La Gráfica 23 presenta una comparación entre los resultados promedio y temperaturas máximas y mínimas extremas obtenidas durante la Fase Tres en cada uno de los ME. En la superficie interior de la losa en el ME1 la oscilación promedio de la temperatura fue de 4.7°C y de 5.4°C en el ME2, ambos representan una mejora frente al módulo de control donde la variación de la temperatura fue de 8.7°C.

En cuanto al comportamiento térmico de la superficie externa, es notoria la reducción de la oscilación en los módulos con doble cubierta en comparación con el módulo de control, donde la temperatura máxima promedio alcanzó los 37.9°C, mientras que en el ME2 alcanzó 33.0°C y en el ME1 31.6°C.

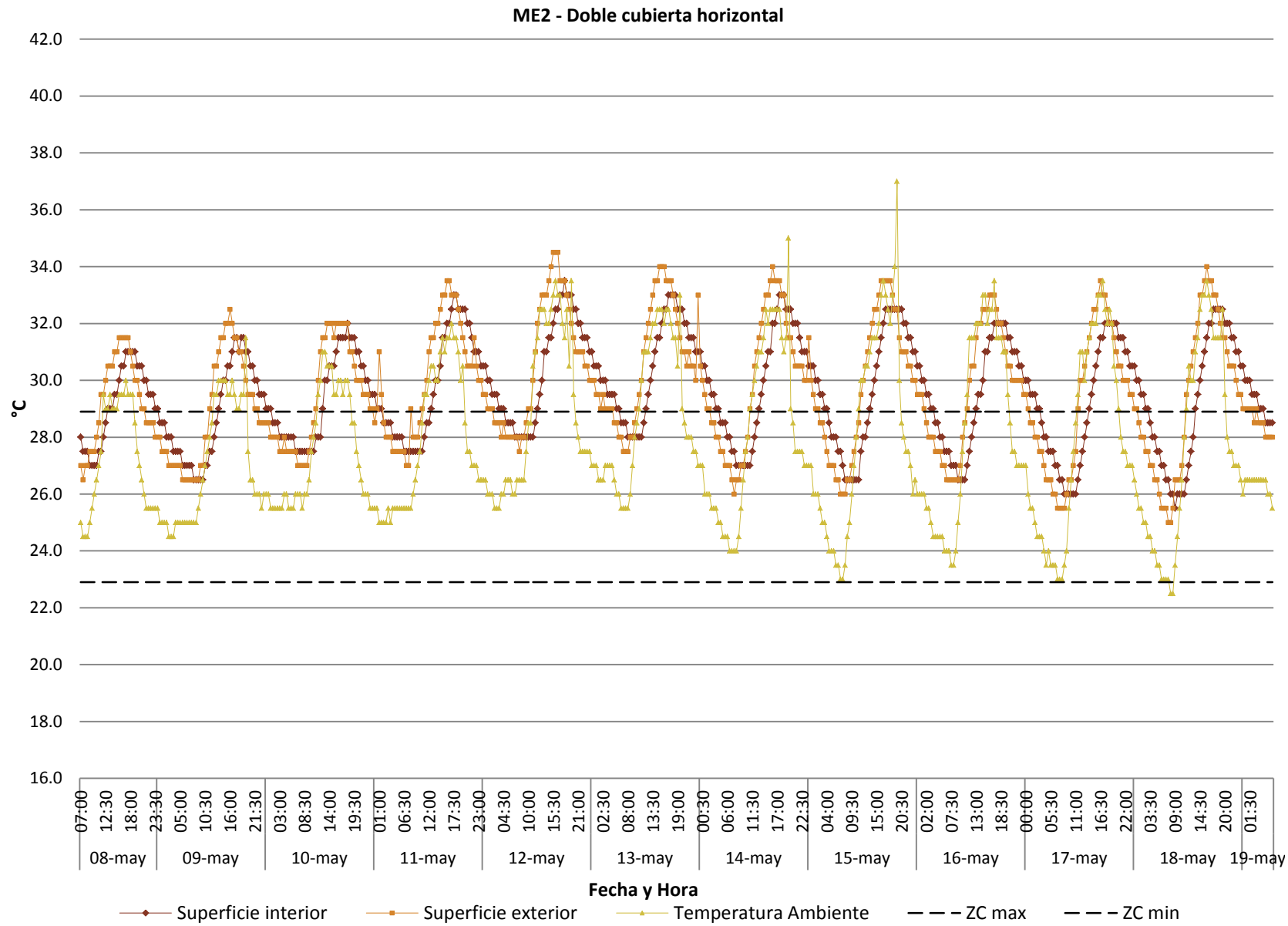


Gráfica 23. Gráfica comparativa de resultados obtenidos en la Fase Tres.

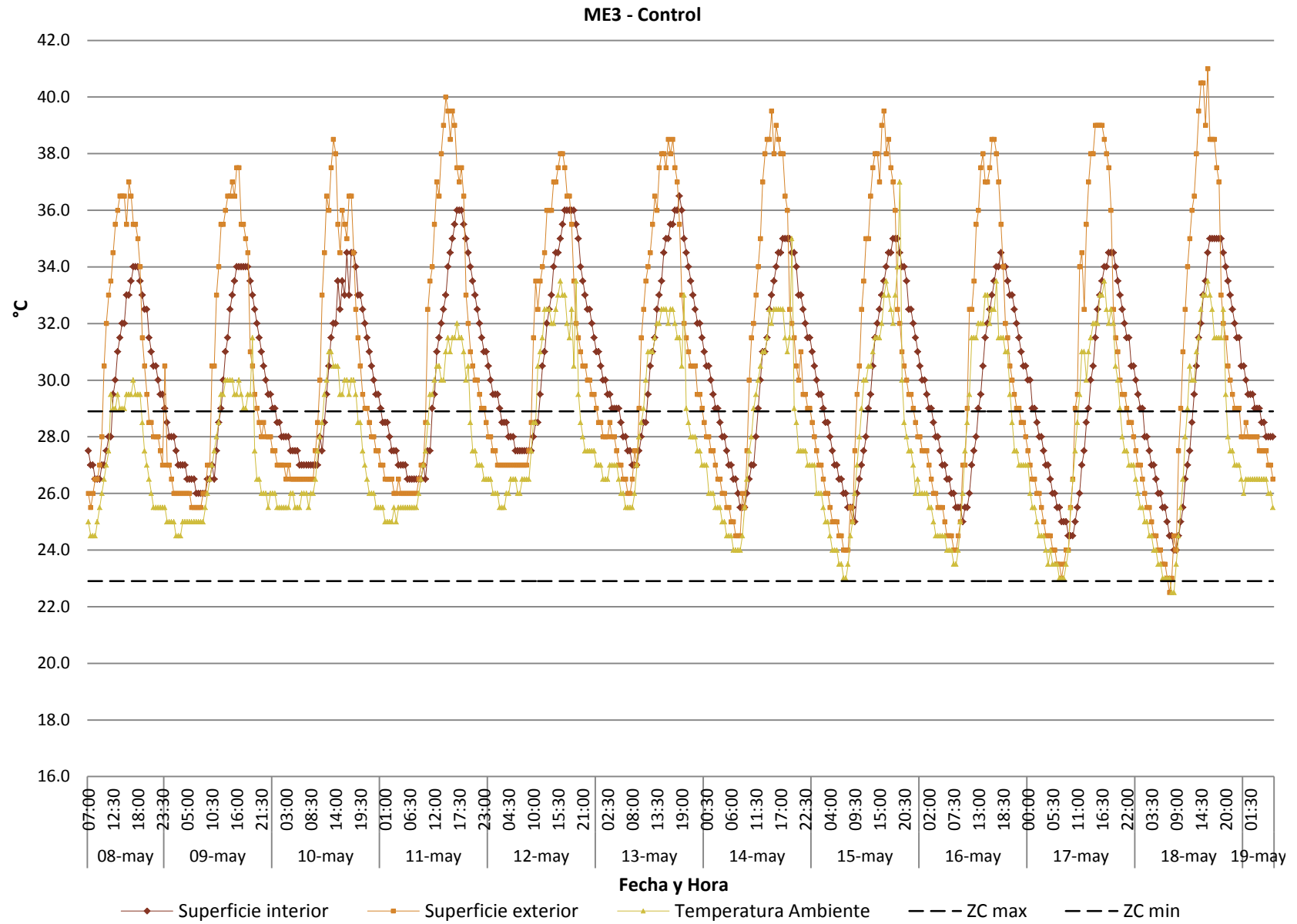
Al igual que durante la Fase Dos, en el periodo primaveral las temperaturas de la superficie interior y exterior de los módulos experimentales tiene un comportamiento muy similar, si bien ambos módulos presentan un mejor comportamiento térmico que el módulo de control, la diferencia entre ellos es apenas perceptible si se analizan sólo las temperaturas características, por lo que se anexan a continuación las gráficas 24, 25 y 26, en donde se presentan los resultados del monitoreo de los módulos durante la Fase 3, cada 30 minutos a lo largo de un periodo de 11 días del mes de mayo.



Gráfica 24. Temperaturas horarias registradas en el ME1 durante la Fase Tres.



Gráfica 25. Temperaturas horarias registradas en el ME2 durante la Fase Tres.



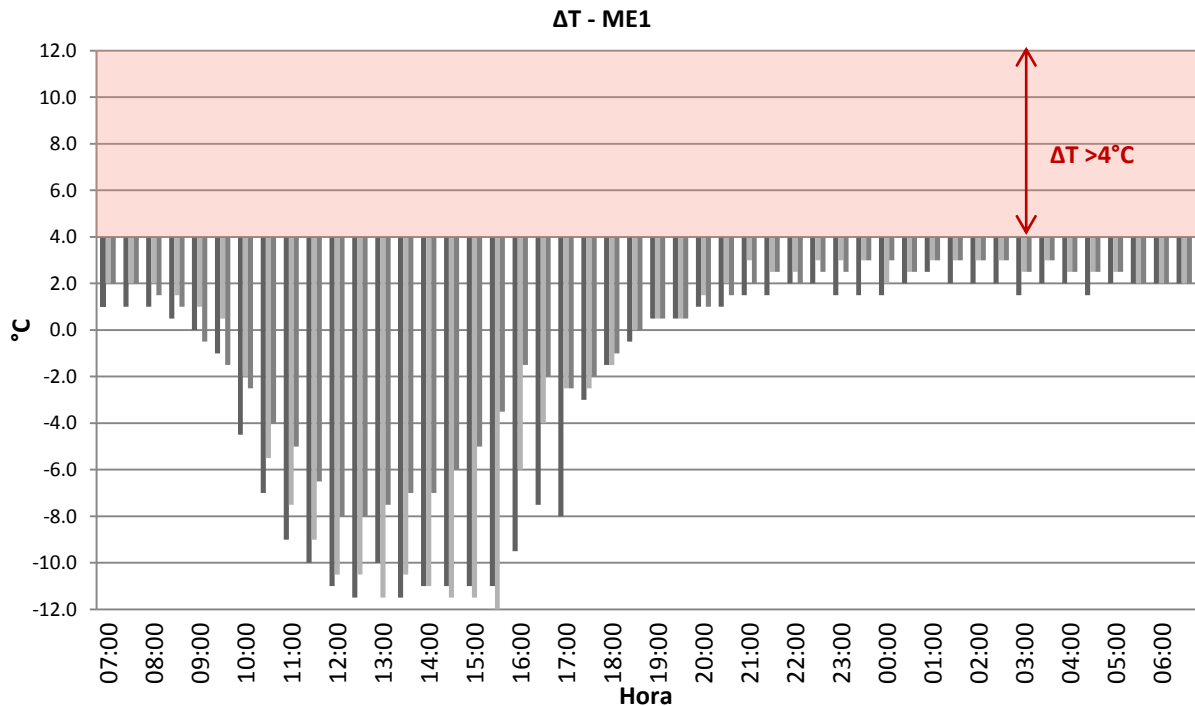
Gráfica 26. Temperaturas horarias registradas en el ME2 durante la Fase Tres.

Temperatura de la superficie interior del techo

En este apartado se analiza únicamente el comportamiento de la temperatura de la superficie interna de la losa en comparación con la temperatura ambiente, se considera que el comportamiento térmico del sistema de doble cubierta será adecuado siempre que la temperatura interna de la losa no sea mayor a la temperatura ambiente por más de 4°C, dicha diferencia se designa como ΔT . Esta condición, en climas cálido húmedos, se considera la apropiada para obtener un flujo de calor admisible y propiciar condiciones adecuadas de confort térmico.

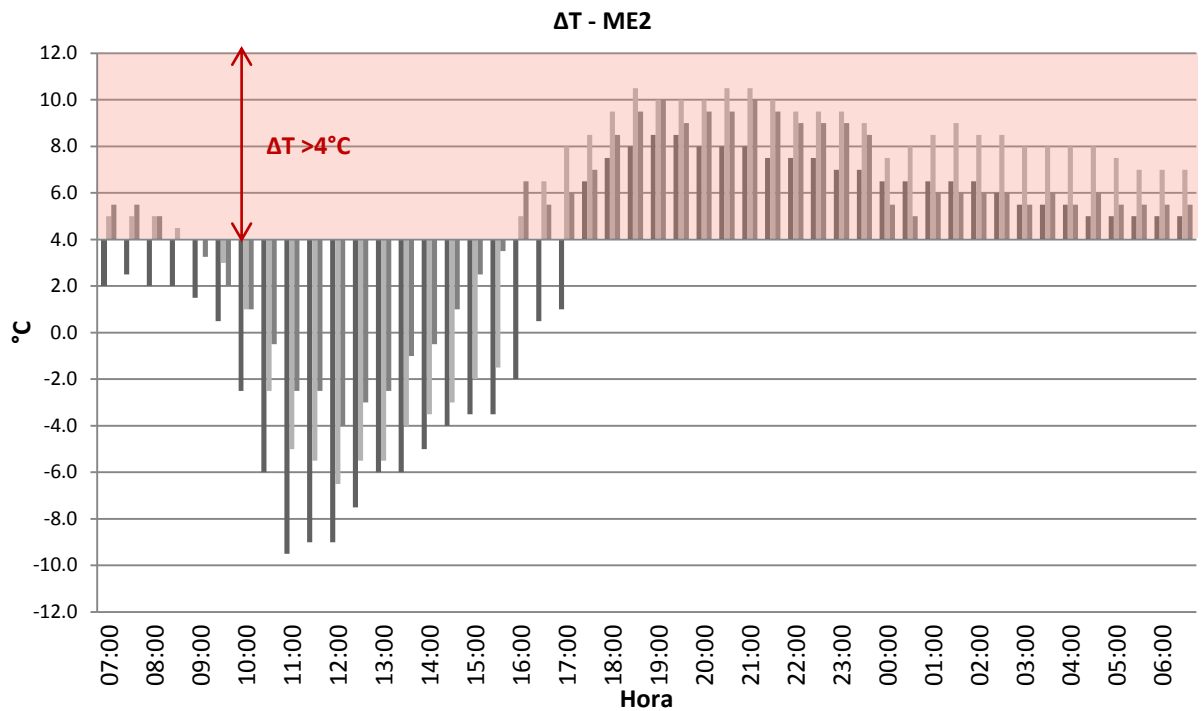
Fase Uno

La Gráfica 27 muestra los resultados del cálculo de ΔT en el ME1, se observa que durante el 100% del tiempo monitoreado la temperatura interna de la losa no rebasó por más de 4°C a la temperatura ambiente, e incluso fue más baja entre las 09:30 y las 18:00 horas hasta por 12°C.

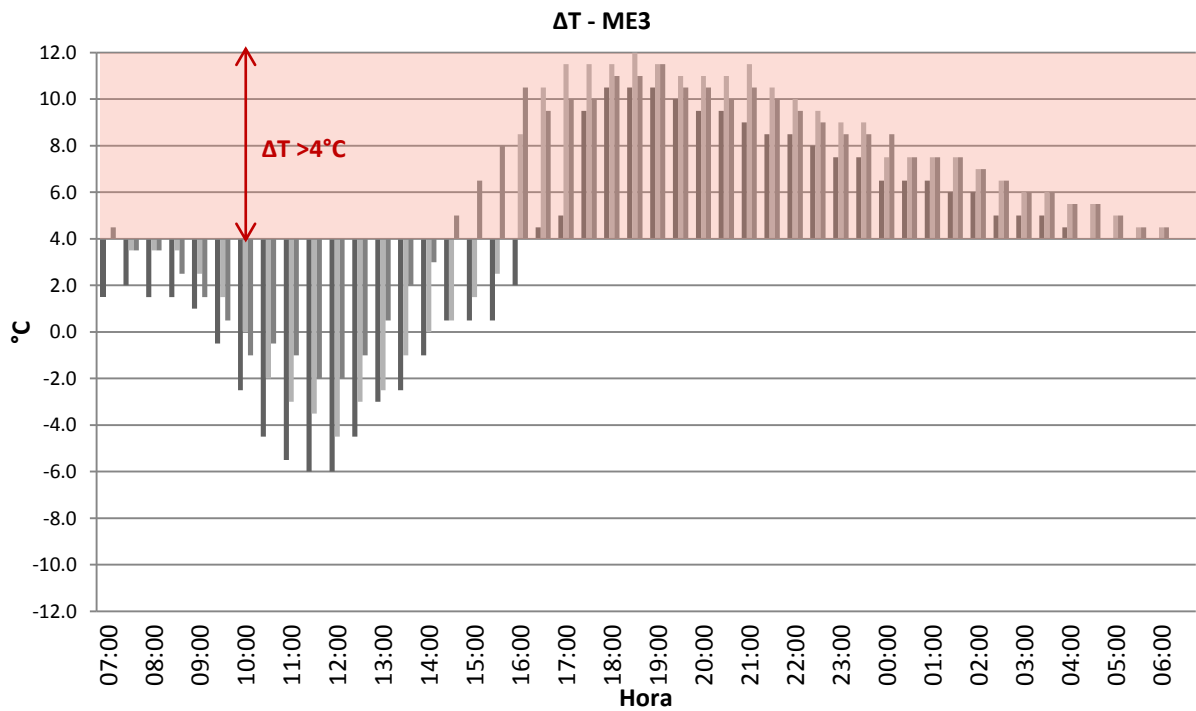


Para el ME2, ΔT fue menor a 4°C durante el 34.7% del tiempo monitoreado, como se observa en la Gráfica 28; el tiempo restante, a partir de las 16:00 y durante toda la noche, ΔT es mayor a 4°C alcanzando valores de hasta 10.5°C entre las 19:00 y las 21:00.

En el caso del ME3, con la superficie externa en color terracota, ΔT estuvo dentro del rango aceptable durante el 40.2%, rebasando los 4°C a partir de las 14:30 horas hasta el amanecer (Gráfica 29).



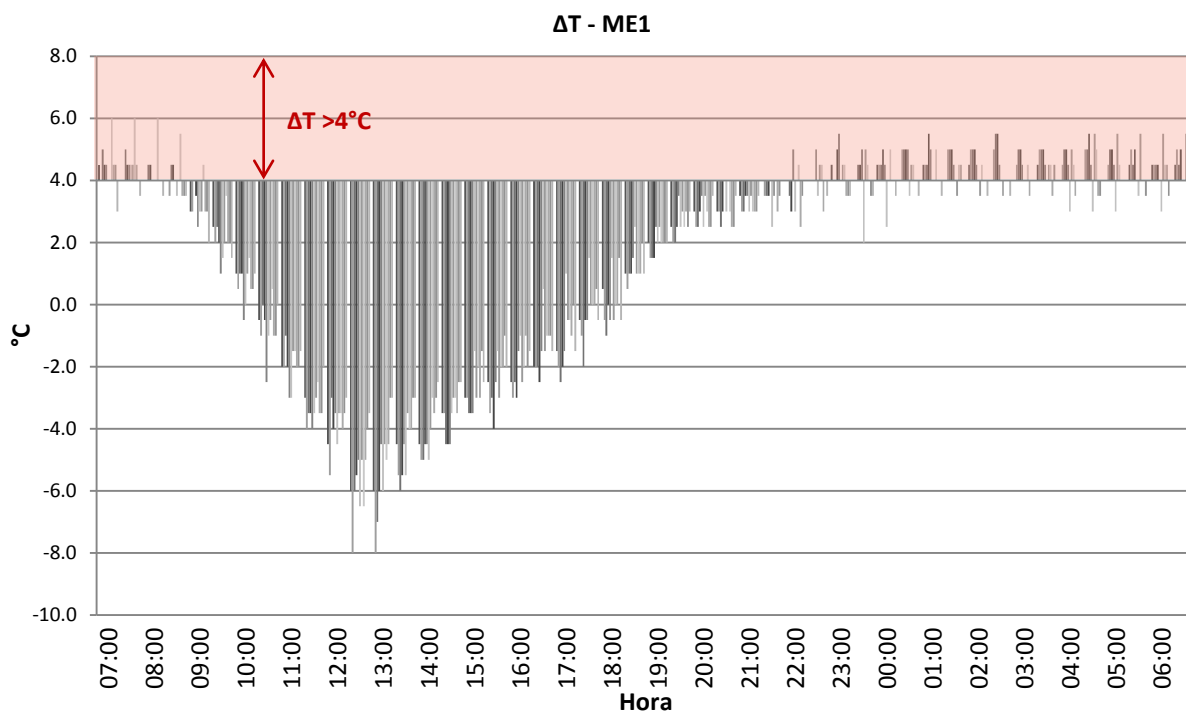
Gráfica 28. ΔT en el ME2 con la superficie externa de la losa en color plata.



Gráfica 29. ΔT en el ME3 con la superficie externa de la losa en color terracota.

Fase Dos

Durante la Fase Dos, en el periodo de invierno, el cálculo de ΔT para el ME1 (con doble cubierta de lámina inclinada 15° al Sur) resultó dentro del rango aceptable durante el 77.6% del tiempo monitoreado (Gráfica 30), rebasó el límite de los 4°C alrededor de las 21:00 horas y durante toda la noche, de igual manera por las mañanas entre las 07:00 y las 9:00 horas.

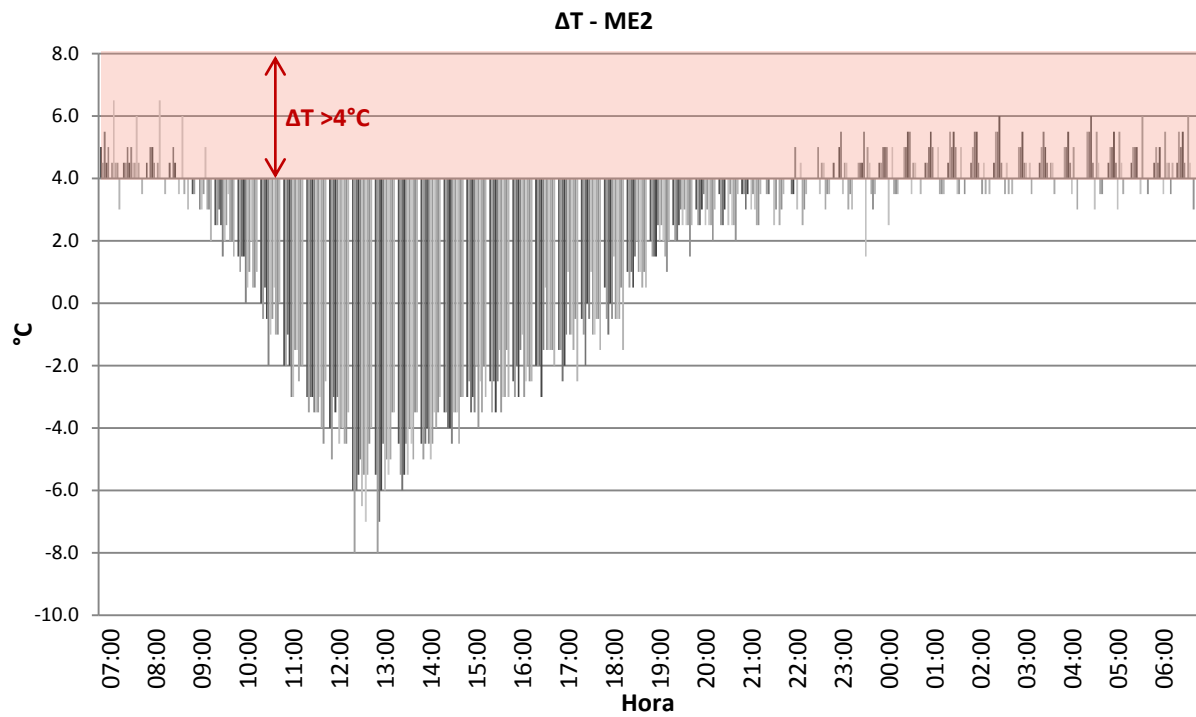


Gráfica 30. ΔT obtenida en el ME1 durante la Fase Dos.

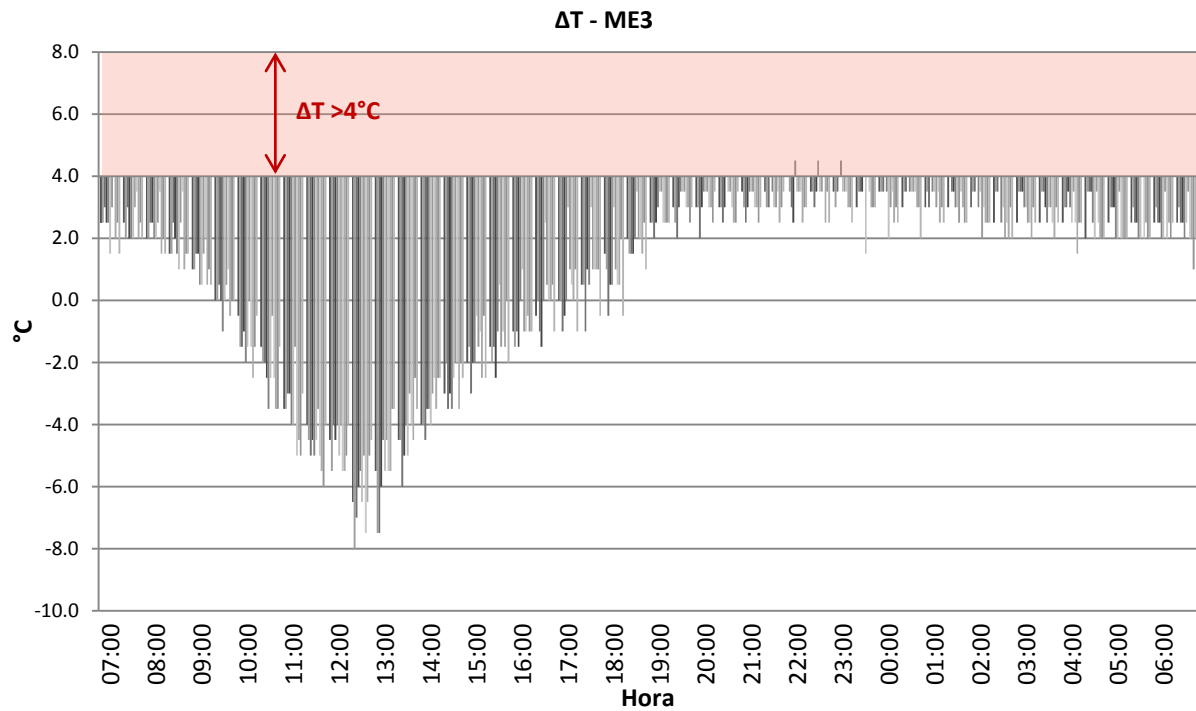
Para el caso del ME2 (doble cubierta en posición horizontal) ΔT fue menor a 4°C durante el 75.0% del tiempo, como se muestra en la Gráfica 31, y está fuera del rango aceptable entre las 07:00 y las 10:00 horas y entre las 21:00 y las 6:30, periodos en los cuales ΔT no resultó mayor a 6°C.

Los resultados del monitoreo de temperatura y cálculo de ΔT en el ME3 se muestran en la Gráfica 32, se obtuvieron resultados dentro del rango aceptable durante 99.4% del periodo monitoreado; ΔT fue mayor a 4°C durante un breve espacio entre 22:30 y 23:00 horas.

Es importante señalar que el comportamiento de ΔT es similar en los tres módulos, durante el periodo de invierno el módulo de control obtuvo mejores resultados que los ME con el sistema de doble cubierta, sin embargo no se considera que sean negativos dado que durante las horas del día cuando ΔT rebasa el rango aceptable, la temperatura ambiente está por debajo de la zona de confort, por lo que se considera que este sobrecalentamiento de la losa no afectaría el confort térmico del usuario.



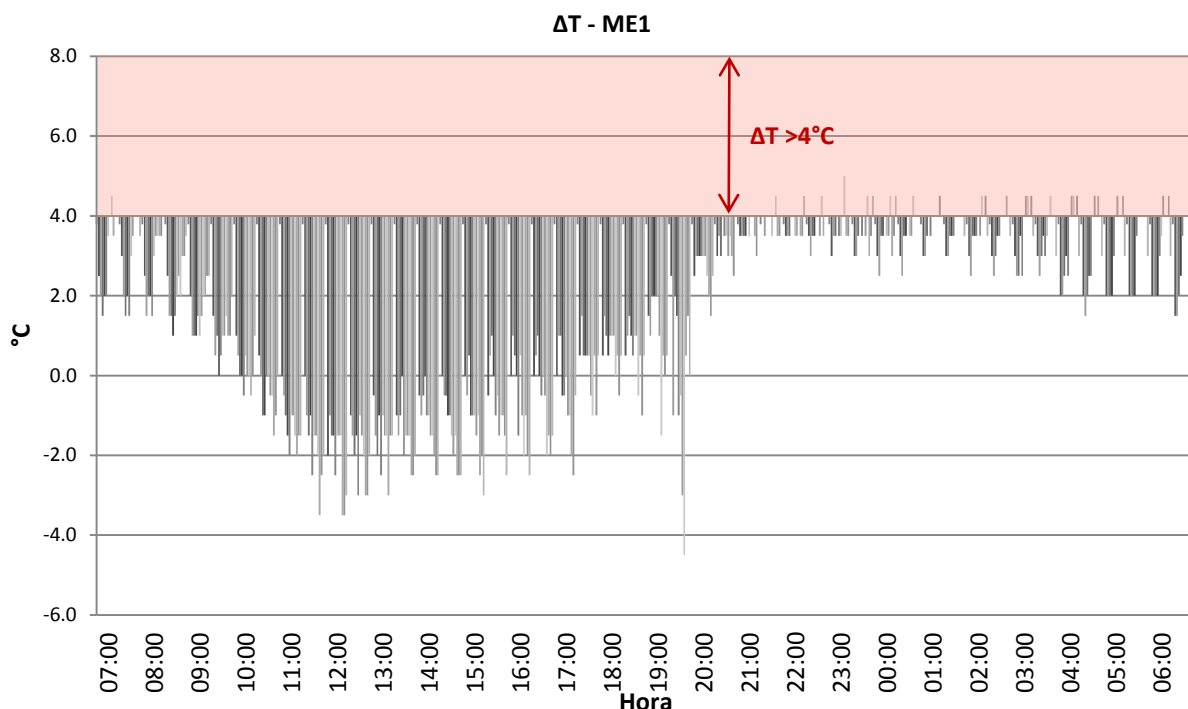
Gráfica 31. ΔT obtenida en el ME2 durante la Fase Dos.



Gráfica 32. ΔT obtenida en el ME3 durante la Fase Dos.

Fase Tres

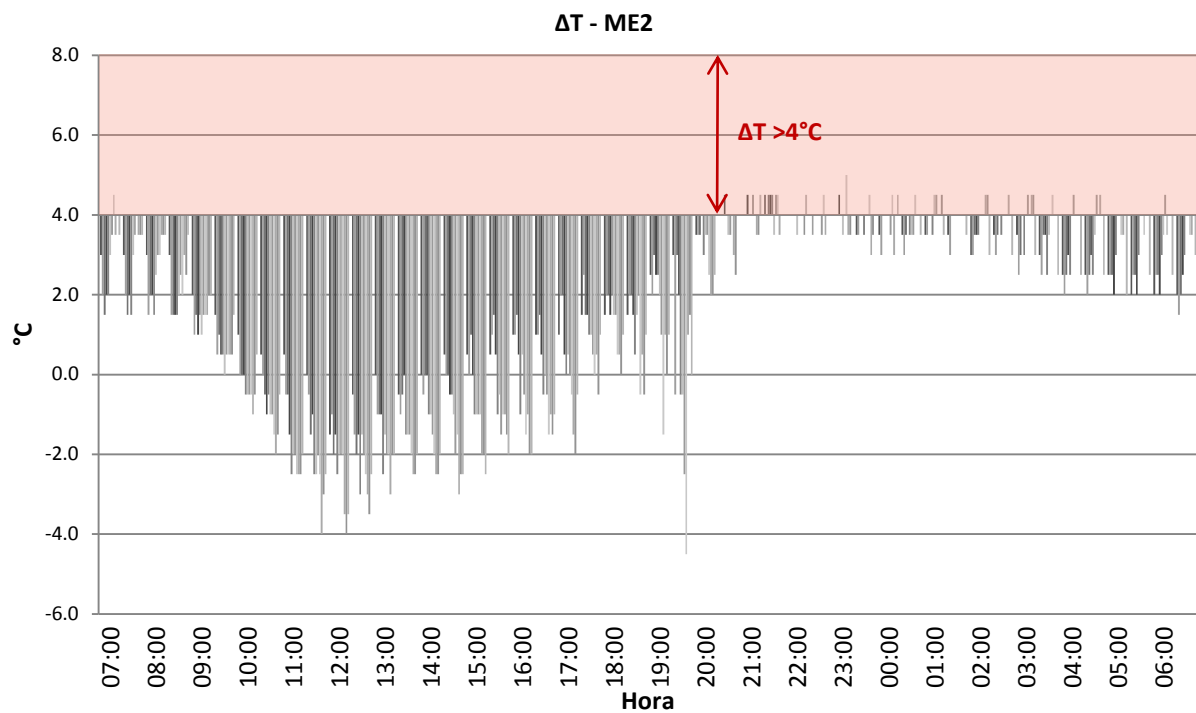
La Gráfica 33 muestra los resultados del cálculo de ΔT para el ME1, los cuales están dentro del rango aceptable durante 94.9% del tiempo. El monitoreo muestra que ΔT es mayor a 4°C por las noches a partir de las 22:00 horas, y durante el todo el día, cuando hay radiación solar, la temperatura interna de la losa es hasta 2.0°C inferior a la temperatura ambiente.



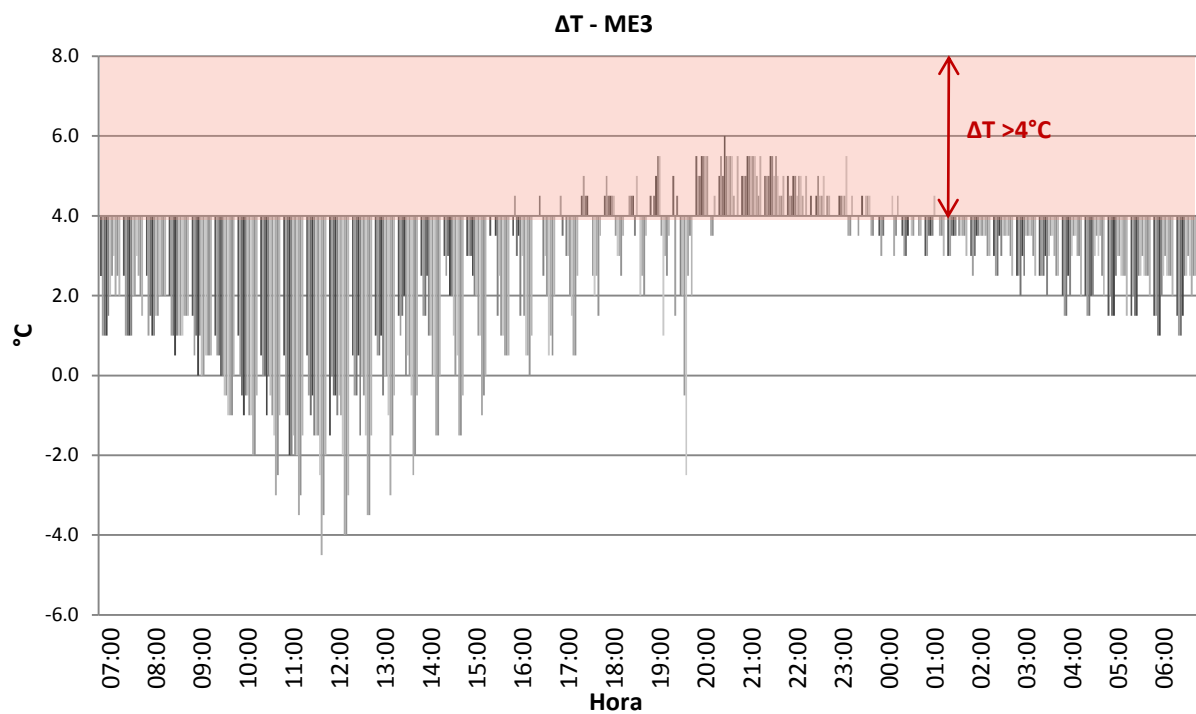
Gráfica 33. ΔT obtenida en el ME1 durante la Fase Tres.

Los resultados de ΔT para el ME2 se presentan en la Gráfica 34, donde el valor de ΔT está dentro del rango aceptable el 93.8% del tiempo monitoreado, es notorio que se rebasa el límite establecido durante las noches a partir de las 20:00 horas, y por momentos hasta antes del amanecer. La diferencia entre los resultados obtenidos en el ME1 y el ME2 es del 1.1%, y el comportamiento de ΔT a lo largo del día es muy similar en ambos módulos, sin embargo en el ME1 se presenta un retardo térmico de dos horas, en comparación con el ME2, cuando ΔT supera el límite de los 4°C.

En módulo de control (ME3), ΔT está dentro del rango aceptable durante el 82.0% del periodo registrado, como se muestra en la Gráfica 35. La temperatura interna de la losa es mayor a la temperatura ambiente (por más de 4.0°C) entre las 15:00 y las 02:00 horas, hasta por un máximo de 6.0°C. Si bien la diferencia entre el ME1 y ME2 es mínima, la diferencia entre el módulo de control y el ME1 es de 12.9%, y de 11.8% con el ME2, resultados favorables para los módulos con el sistema de doble cubierta ventilada.



Gráfica 34. ΔT obtenida en el ME2 durante la Fase Tres.



Gráfica 35. ΔT obtenida en el ME3 durante la Fase Tres.

Síntesis y discusión de resultados

En la Fase Uno de esta investigación se estudiaron tres módulos experimentales (denominados ME1, ME2 y ME3) con el objetivo de determinar el efecto térmico que tiene el color superficial de una losa de concreto en la transmisión de calor por conducción al interior de un espacio, por lo tanto la temperatura interna de la losa es el principal elemento de análisis.

Los resultados del monitoreo de las temperaturas en los módulos se presentan en la Tabla 2, el ME1 con la cara externa de la losa en color blanco registró una oscilación promedio diaria en la temperatura de la superficie interior de 8.7°C, para el ME2 con la superficie expuesta al Sol en color plata fue de 16.0°C y en el ME3 con la superficie exterior de color terracota fue de 20.2°C.

	Superficie externa				Superficie interna		
	TMáx	TMín	Oscilación		TMáx	TMín	Oscilación
ME1	30.7°C	19.7°C	11.0°C	ME1	28.8°C	20.2°C	8.7°C
ME2	42.3°C	21.8°C	20.5°C	ME2	38.5°C	22.5°C	16.0°C
ME3	45.7°C	21.0°C	24.7°C	ME3	41.8°C	21.7°C	20.2°C

Tabla 2. Temperaturas promedio diarias registradas durante la Fase Uno.

La oscilación promedio de la temperatura ambiente durante esta fase del estudio fue de 15.4°C, al comparar estos resultados se observó que el módulo con la superficie externa color blanco fue el único en el que se presentó una reducción de la variación de la temperatura. Esto se debe a que las superficies en colores claros pueden reflejar hasta el 80% de la radiación solar entrante, en las condiciones de este estudio una losa con la superficie externa en color blanco representa una significativa mejora respecto al color terracota, el cual es el más utilizado en los impermeabilizantes.

Un dato interesante es que las temperaturas registradas en la lámina metálica color blanco durante dos semanas del mes mayo (Anexo 4), fueron de 47.5°C máxima y 19.0°C mínima, lo que representa una oscilación de 28.5°C. Estos valores son muy parecidos a los obtenidos durante el invierno en la losa color terracota, que fueron temperaturas máximas de 45.7°C en la superficie exterior y 41.8°C al interior. Si bien no se cuenta con los datos del comportamiento térmico de una losa color terracota durante la primavera, se infiere que no son mejores que los obtenidos durante el invierno, debido a que la temperatura ambiente y la intensidad de la radiación solar son mayores.

Durante las Fases Dos y Tres se estudiaron experimentalmente dos configuraciones de doble cubierta ventilada utilizando lámina metálica como blindaje externo, con el objetivo de evaluar su comportamiento térmico y compararlo frente a un módulo de control. Se tomaron en consideración los resultados obtenidos durante la Fase uno, razón por la cual a los tres módulos les fue pintada la superficie externa de la losa de color blanco.

Se analizaron las temperaturas características de los módulos experimentales (ME1 y ME2) y del módulo de control (ME3) teniendo como marco de referencia los valores de temperatura del ambiente y el rango de confort. El otro elemento de análisis, al igual que en la primer fase, fue la temperatura de la superficie interna de la losa, bajo la condición de que la diferencia entre ésta y la temperatura ambiente no fuera de más de 4°C, para obtener un flujo de calor admisible.

Los resultados de las temperaturas características obtenidas durante la Fase Dos se muestran en la Tabla 3, y los obtenidos durante la Fase Tres se presentan en la Tabla 4, la diferencia entre la oscilación de la temperatura en el ME1 y ME2 respecto al ME3 indica la eficiencia del amortiguamiento de la temperatura proporcionado por la doble cubierta.

Superficie externa				Superficie interna			
	TMáx	TMín	Oscilación		TMáx	TMín	Oscilación
ME1	30.1°C	22.7°C	4.2°C	ME1	29.3°C	23.1°C	6.1°C
ME2	30.0°C	23.0°C	7.0°C	ME2	29.0°C	23.5°C	5.5°C
ME3	35.0°C	20.1°C	14.9°C	ME3	30.3°C	21.0°C	9.3°C

Tabla 3. Temperaturas promedio diarias registradas durante la Fase Dos.

Superficie externa				Superficie interna			
	TMáx	TMín	Oscilación		TMáx	TMín	Oscilación
ME1	31.7°C	26.3°C	5.4°C	ME1	31.6°C	26.6°C	5.0°C
ME2	33.0°C	26.2°C	6.8°C	ME2	32.1°C	26.5°C	5.6°C
ME3	38.2°C	24.7°C	13.6°C	ME3	34.5°C	25.5°C	9.0°C

Tabla 4. Temperaturas promedio diarias registradas durante la Fase Tres.

Con los resultados obtenidos del análisis de las temperaturas características se concluye que las diferencias entre la segunda cubierta inclinada 15° orientada hacia el Sur (ME1) y una segunda cubierta horizontal (ME2) son mínimas.

Es importante mencionar el papel que desempeña el espacio ventilado en el sistema, cuya temperatura y humedad fueron monitoreadas a la par de las temperaturas de las superficies de los módulos. Durante la Fase Dos, la temperatura del espacio ventilado en ambos módulos no rebasó los 33.3°C, apenas dos grados centígrados más que la temperatura máxima registrada en el ambiente; además la temperatura mínima que se registró en el ME1 fue de 19.4°C, y de 20.0°C en el ME2, mientras que la temperatura mínima del ambiente se registró en 19.3°C.

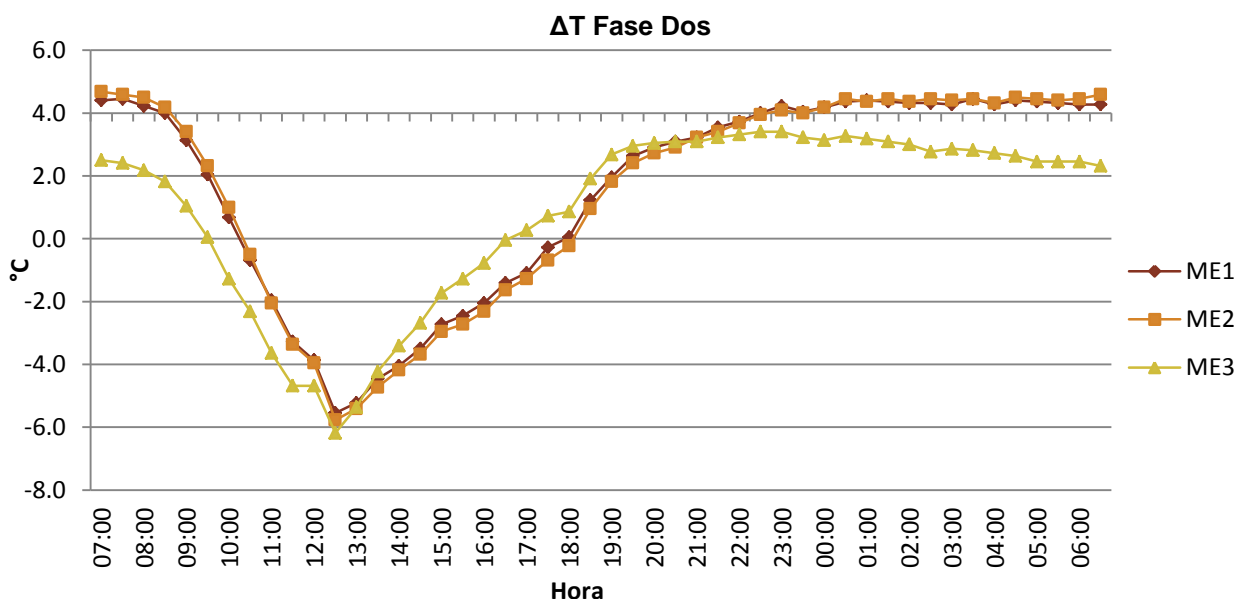
Para la Fase Tres, el espacio ventilado en el ME1 alcanzó un máximo de 32.8°C y mínimo de 24.5°C, en el ME2 se registraron 34.4°C máximo y 24.2°C mínimo, mientras que la temperatura máxima del aire exterior fue de 31.8°C y la mínima de 24.2°C. Se concluye entonces que el calor irradiado por la lámina metálica no sobrecalienta el aire dentro del espacio ventilado, y por lo tanto no se transmite un exceso de

calor hacia la losa. Mediante los datos obtenidos es posible verificar la importancia que el fenómeno de descarga de calor por flotación natural del aire caliente tiene en este sistema, si bien no se cuenta con datos precisos al respecto, es claro que el aire caliente es removido con facilidad.

Respecto a la humedad relativa, se observó que tanto en la Fase Dos como en la Fase Tres, la humedad disminuye alrededor de un 10% dentro del espacio ventilado respecto a la humedad relativa ambiente durante las horas donde hay radiación solar. La diferencia es más notoria entre las 10:00 y las 17:00 horas, cuando la temperatura del espacio ventilado es mayor que la del ambiente.

Otro elemento de análisis fue la diferencia entre la temperatura de la superficie interna de la losa de los módulos experimentales y la temperatura ambiente, que en este estudio fue denominada ΔT . Se considera que el flujo de calor a través del sistema de doble cubierta ventilada es aceptable cuando la temperatura de la losa no rebasa a la temperatura ambiente por más de 4.0°C.

Los resultados del cálculo del promedio de ΔT durante la Fase Dos se muestran en la Gráfica 36, se observa un comportamiento similar de la curva de temperaturas de los tres módulos, la diferencia entre el ME1 y el ME2 es mínima. El módulo de control o ME3 presenta mejores resultados dado que ΔT es menor a 4.0°C durante mayor cantidad de horas, sin embargo entre las 12:30 y 20:30 los módulos con doble cubierta son más eficientes para reducir el flujo de calor.

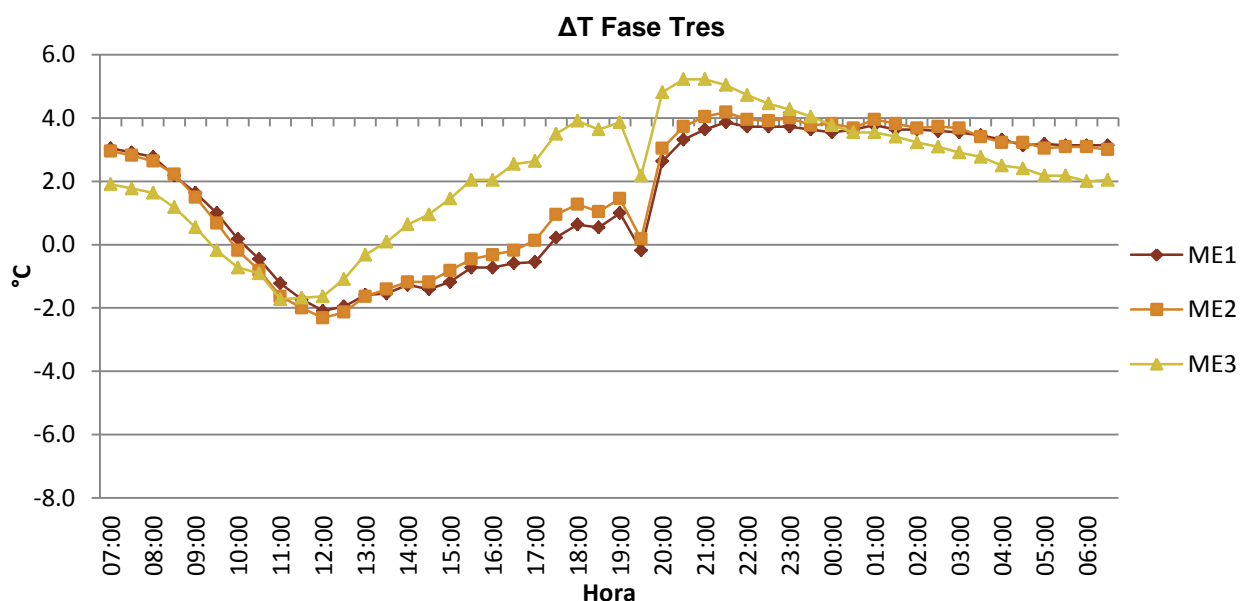


Gráfica 36. Diferencia entre la temperatura interna de la losa y la temperatura ambiente en invierno.

Durante la Fase Tres, el comportamiento de ΔT se exhibe en la Gráfica 37, es notorio que la temperatura interna de la losa en el módulo de control es mayor a la temperatura del aire durante la mayor parte del día, en las horas más calurosas que son entre las 10:00 y las 20:00 horas. El comportamiento de ΔT es

muy similar entre los módulos con segunda cubierta, sin embargo está la mayor parte del tiempo por debajo de los resultados obtenidos en el módulo de control, que tiene una eficiencia del 82.0%, frente a 94.9% del ME1 y 93.8% del ME2.

En ambas fases, invierno y primavera, se observa que durante las noches el comportamiento del módulo de control es mejor que los que poseen el blindaje externo de lámina, por lo que se concluye que el beneficio que brinda durante el día, no es el mismo por la noche, debido a que reduce la pérdida de calor por irradiación nocturna al no dejar expuesto el techo principal de losa de concreto.



Gráfica 37. Diferencia entre la temperatura interna de la losa y la temperatura ambiente en primavera.

La Tabla 5 presenta una síntesis de los resultados obtenidos durante las fases Dos y Tres de la experimentación, donde se registraron las temperaturas internas y externas de la cubierta losa protegida por la segunda cubierta de lámina galvanizada. Se muestran las temperaturas registradas en horarios representativos como el amanecer (7:00), la hora más calurosa del día (15:00).

También se muestra la temperatura ambiente, indicando si en ese horario específico se encontraba dentro o fuera de la zona de confort, y la diferencia entre la temperatura interna de la losa y la temperatura ambiente (ΔT) indicando si se cumple la condición $\Delta T < 4^{\circ}\text{C}$.

Es notorio que en ambas fases de estudio cuando la temperatura ambiente está en discomfort, durante las horas de mayor insolación, la temperatura interna de la losa está dentro del rango admisible para considerar que el flujo de calor a través de ella es aceptable. Dichas condiciones se presentan también en el módulo de control, pero es importante recalcar que la superficie externa de la losa es color blanco, lo que contribuye en gran medida a su buen desempeño térmico.

	Hora	Fase Dos						Fase Tres					
		Tse	Tsi	TA	ΔT	$\Delta T < 4^{\circ}C$		Tse	Tsi	TA	ΔT	$\Delta T < 4^{\circ}C$	
ME1	07:00	23.0	23.9	19.6	Confort	4.4	NO	26.5	27.4	24.3	Confort	3.1	SI
	10:00	23.3	23.0	22.4	Confort	0.5	SI	27.4	27.1	26.8	Confort	0.4	SI
	12:00	26.2	24.0	30.9	Disconfort	-6.8	SI	29.4	27.8	29.9	Disconfort	-2.2	SI
	15:00	29.1	27.2	30.2	Disconfort	-3.0	SI	31.2	29.9	31.2	Disconfort	-1.3	SI
	18:00	28.7	28.9	28.8	Disconfort	0.0	SI	31.3	31.3	30.9	Disconfort	0.5	SI
	21:00	27.7	28.6	25.4	Confort	3.2	SI	29.5	30.8	27.2	Confort	3.6	SI
	00:00	26.5	27.5	23.3	Confort	4.2	NO	28.7	29.8	26.3	Confort	3.4	SI
	03:00	25.1	26.0	21.8	Disconfort	4.3	NO	27.7	28.7	25.3	Confort	3.4	SI
ME2	07:00	23.3	24.1	19.6	Confort	4.6	NO	26.4	27.3	24.3	Confort	3.0	SI
	10:00	23.5	23.4	22.4	Confort	1.0	SI	27.4	26.7	26.8	Confort	0.0	SI
	12:00	26.1	24.4	30.9	Disconfort	-6.5	SI	30.1	27.6	29.9	Disconfort	-2.3	SI
	15:00	29.0	27.2	30.2	Disconfort	-2.9	SI	32.3	30.3	31.2	Disconfort	-0.9	SI
	18:00	28.8	28.8	28.8	Disconfort	0.0	SI	32.3	32.1	30.9	Disconfort	1.2	SI
	21:00	28.0	28.6	25.4	Confort	3.2	SI	30.1	31.2	27.2	Confort	4.0	SI
	00:00	26.6	27.5	23.3	Confort	4.2	NO	29.2	30.0	26.3	Confort	3.7	SI
	03:00	25.3	26.2	21.8	Disconfort	4.4	NO	28.0	28.8	25.3	Confort	3.6	SI
ME3	07:00	20.5	22.1	19.6	Confort	2.5	SI	24.8	26.3	24.3	Confort	1.9	SI
	10:00	23.5	21.0	22.4	Confort	-1.5	SI	28.8	26.1	26.8	Confort	-0.6	SI
	12:00	30.0	23.6	30.9	Disconfort	-7.3	SI	34.1	28.2	29.9	Disconfort	-1.7	SI
	15:00	33.8	28.3	30.2	Disconfort	-1.9	SI	37.2	32.4	31.2	Disconfort	1.2	SI
	18:00	28.3	29.8	28.8	Disconfort	1.0	SI	35.8	34.4	30.9	Disconfort	3.6	SI
	21:00	26.3	28.5	25.4	Confort	3.1	SI	29.3	32.3	27.2	Confort	5.1	NO
	00:00	24.5	26.5	23.3	Confort	3.1	SI	27.9	29.9	26.3	Confort	3.6	SI
	03:00	22.8	24.6	21.8	Disconfort	2.9	SI	26.4	28.1	25.3	Confort	2.8	SI

Tabla 5. Tabla de síntesis de resultados.

En general, las diferencias entre las temperaturas internas de la losa en los tres módulos experimentales son pocas en términos cuantitativos, sin embargo es el comportamiento de dichas temperaturas a lo largo del día y el hecho de que ΔT sea menor a $4^{\circ}C^{12}$ durante la mayor parte del tiempo monitoreado en los módulos con doble cubierta, lo que permite afirmar que el sistema de doble cubierta tiene el potencial de brindar condiciones adecuadas de confort térmico al interior de los espacios

Con base en el análisis de los resultados obtenidos se concluye que el arreglo de doble cubierta que tiene un mayor aporte al efecto buscado (disminución de la temperatura interior respecto a la temperatura ambiente y reducción de la oscilación térmica) para las condiciones de este estudio, es la segunda cubierta inclinada 15° al Sur.

¹² De acuerdo con lo establecido por Koenigsberger (1974).

Conclusión

La presente investigación se planteó partiendo de la afirmación de que una cubierta común de losa de concreto, carente de protección térmica, traerá como consecuencia la falta de confort adecuado de los usuarios y el aumento del gasto energético, principalmente durante los meses de verano ya que se requerirá de la implementación de sistemas de acondicionamiento electromecánico.

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, en los climas cálidos, donde la principal necesidad es minimizar las ganancias de calor en los techos, son deseables altos valores de reflectancia solar y emisividad térmica, que se pueden encontrar en las superficies de metal prepintadas con colores claros y/o pigmentos reflectantes de radiación infrarroja. Por ello, se propuso la implementación de un sistema de doble cubierta ventilada, utilizando lámina metálica color blanco como protección de una losa de concreto.

De acuerdo con los resultados de la experimentación, la cubierta de concreto sin protección alcanzó temperaturas superficiales más altas que la temperatura ambiente durante las horas de mayor insolación tanto en invierno como en primavera. Las temperaturas máximas en las superficies externas se presentaron en promedio dos horas después del mediodía solar y en las superficies internas en momentos más cercanos al ocaso (19:00 horas) periodo a partir del cual comienza la pérdida del calor acumulado.

La segunda cubierta de lámina metálica fue efectiva en propiciar el flujo de calor adecuado al interior y por lo tanto en proveer condiciones para la mejora del confort térmico, ya que gracias a su protección la temperatura superficial interna de la losa fue menor que la temperatura ambiente por más de 4°C durante las horas en que se recibió mayor radiación solar, entre las 10:00 y las 19:00 horas.

Se considera que la propiedad reflectiva de la superficie blanca de las láminas, es el factor más importante en la prevención del sobrecalentamiento de la cubierta principal. Para mantener la eficiencia del sistema, de acuerdo con la bibliografía consultada, se recomienda mantener los niveles de absorptancia solar de la segunda cubierta entre el 70% y el 30%.

La configuración que más efectiva en reducir el flujo de calor al interior, en las condiciones de este análisis, fue la segunda cubierta inclinada 15° al Sur. Es importante considerar que según lo establecido por Gómez (2003) (ver Anexo 2) esta configuración es la que recibe mayor energía proveniente de la radiación solar directa en la latitud de la región de estudio, por lo que se deduce que con otras orientaciones e inclinaciones se podría obtener un mejor desempeño.

La exposición de la lámina metálica al ambiente propicia un rápido intercambio de calor entre ésta y el aire, lo que favorece su circulación por la pérdida de densidad efecto de la convección. Aunque el espacio ventilado entre cubiertas registró temperaturas más altas que las del ambiente, no sobrecalentó

la superficie de la losa por lo que se infiere que tal exceso de calor fue disipado mediante la ventilación, por efecto convectivo, aprovechando la estratificación producida por la diferencia de temperatura del aire.

La altura de la cámara ventilada es un factor importante a considerar, pero menos significativo que la absorción solar de la segunda cubierta. Según los resultados obtenidos en la prueba piloto (Anexo 1) se determinó que la altura de la cámara ventilada no debe ser menor a 40 cm, debido a que a partir de esta distancia se registraron temperaturas más cercanas a la temperatura ambiente, y no mayor a 60 cm ya que a partir de esta distancia no se presentan variaciones significativas de la temperatura y además se dificultaría la protección solar.

Se concluye que la doble cubierta de lámina metálica es una solución apta para climas cálidos ya que su superficie puede reflejar gran parte de la radiación solar directa, además de proveer sombra a la cubierta principal. La aplicación de una segunda cubierta puede cambiar el comportamiento térmico del clima interior de un espacio, fue notorio que la cubierta secundaria de lámina permitió amortiguar el impacto de la radiación solar directa sobre la cubierta principal, evitando su sobrecalentamiento y disminuyendo la amplitud de la variación de la temperatura al interior.

Sin embargo, pese a poseer un tiempo de retardo térmico reducido al carecer de masa apreciable, la lámina metálica no evitó los incrementos de temperatura indeseados durante las noches, al no dejar expuesta la losa de concreto dificultando el enfriamiento nocturno por irradiación.

Las ganancias térmicas diarias y la lenta disipación del calor por la noche contribuyeron a la contención del calor interior, manteniéndolo a una temperatura relativamente más alta que la temperatura exterior durante las noches tanto en primavera como en invierno. Esto significa que el sistema propuesto tiene la capacidad de contener las fluctuaciones de temperatura diurnas pero presenta fallas al no hacer frente a la alta inercia térmica asociada con la losa de concreto.

El sistema de doble cubierta resistió la transferencia de calor conductiva mejor que la cubierta común en color blanco durante las tardes de primavera; sin embargo, durante el invierno se obtuvieron mejores resultados sin el sistema de doble cubierta, condición que no se considera negativa dado que el sobrecalentamiento de la superficie interna se presentó durante las noches cuando la temperatura ambiente estuvo por debajo de la zona de confort del usuario.

De los resultados obtenidos en esta investigación se puede deducir que la aplicabilidad de un sistema de doble cubierta ventilada con lámina metálica es conveniente para las condiciones climáticas de Puerto Vallarta, el sistema se comporta adecuadamente como protección térmica en comparación con un techo común de losa de concreto, el rendimiento del blindaje externo durante la temporada calurosa resultó 12.9% mayor que la de la losa de concreto color blanco en las condiciones de este análisis.

El amortiguamiento térmico del sistema puede disminuir los picos en las cargas térmicas de los equipos de aire acondicionado, lo que significaría un ahorro de energía eléctrica, así como la reducción de la amplitud de la variación de la temperatura al interior de un espacio en beneficio del confort de los usuarios.

Con un diseño adecuado, los sistemas de doble cubierta ventilada utilizando láminas metálicas pueden contribuir al ahorro de energía mediante la reducción del efecto de la radiación solar directa sobre los techos y el flujo de calor en las edificaciones, con la ventaja de ser un sistema constructivo de fácil implementación tanto en nueva construcción como sobre cubiertas ya existentes. Además su potencial bajo costo de instalación y mantenimiento, y su nulo consumo de energía eléctrica y agua, convierten a la doble cubierta ventilada en un dispositivo eficiente para las condiciones climáticas de Puerto Vallarta.

En términos de estética, sustentabilidad, eficiencia energética y confort de los usuarios, las láminas metálicas pueden tener un papel importante en muchos sistemas constructivos; la flexibilidad de diseño, combinado con la sostenibilidad, resistencia, durabilidad y bajo coste de ciclo de vida hace de las láminas metálicas material adecuado para los sistemas de cubierta en climas cálidos.

Se considera que este trabajo podría contribuir a la solución del problema ocasionado por el mal desempeño de los materiales de cubierta más utilizados en la región de estudio, mediante la propuesta de un sistema de doble cubierta ventilada con base en un sistema constructivo de fácil implementación e incorporando criterios de acondicionamiento pasivo.

Correspondería para un estudio posterior en esta misma línea de investigación el diseño de todos aquellos detalles constructivos del sistema de doble cubierta ventilada que se requieren para su ensamblaje y que en este trabajo sólo se presentan planteándose alternativas de solución centradas en sus características geométricas de orientación e inclinación y su estado superficial.

De igual manera queda abierta la posibilidad de un análisis posterior que involucre la incorporación de materiales aislantes, la posibilidad de movilidad de la segunda cubierta durante las noches, y el comportamiento del sistema de doble cubierta con la reducción de su índice de reflectancia solar debido a su exposición al ambiente.

Propuesta de diseño

Se presenta una propuesta para la colocación de una segunda cubierta de lámina metálica sobre una cubierta plana, consistente en un módulo (Figura 41) que cubre una superficie 1.00x1.18m (1.18 m²) y tiene una inclinación de 15° al Sur.

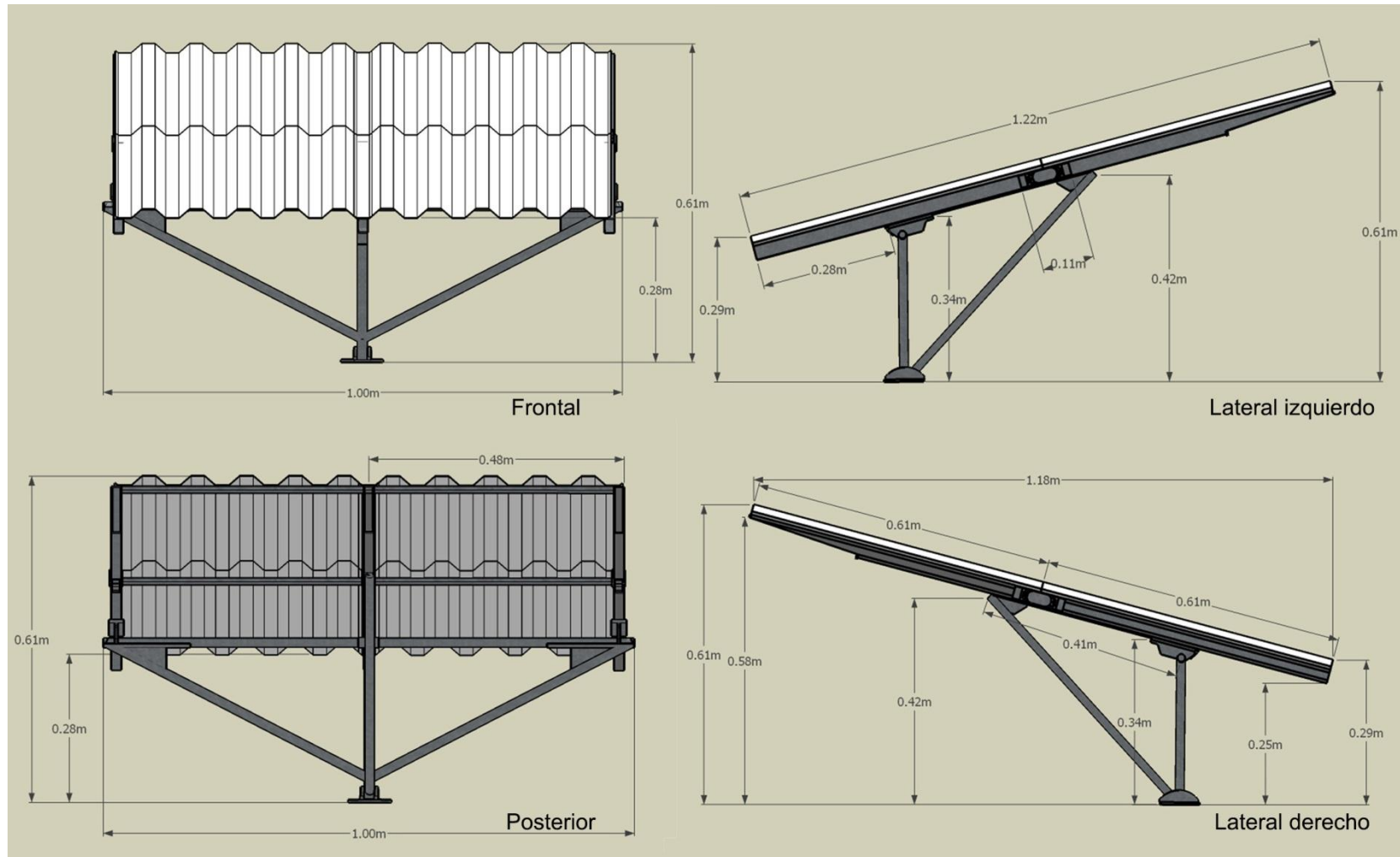


Figura 41. Módulo de doble cubierta de lámina metálica.

Como medida de protección ante las inclemencias del clima, debido a que la zona de estudio es una costa donde hay probabilidades de huracanes y tormentas, se propone un mecanismo para que el sistema de doble cubierta se pliegue por medio de bisagras y permanezca en posición horizontal a pocos centímetros de la losa (Figura 42).

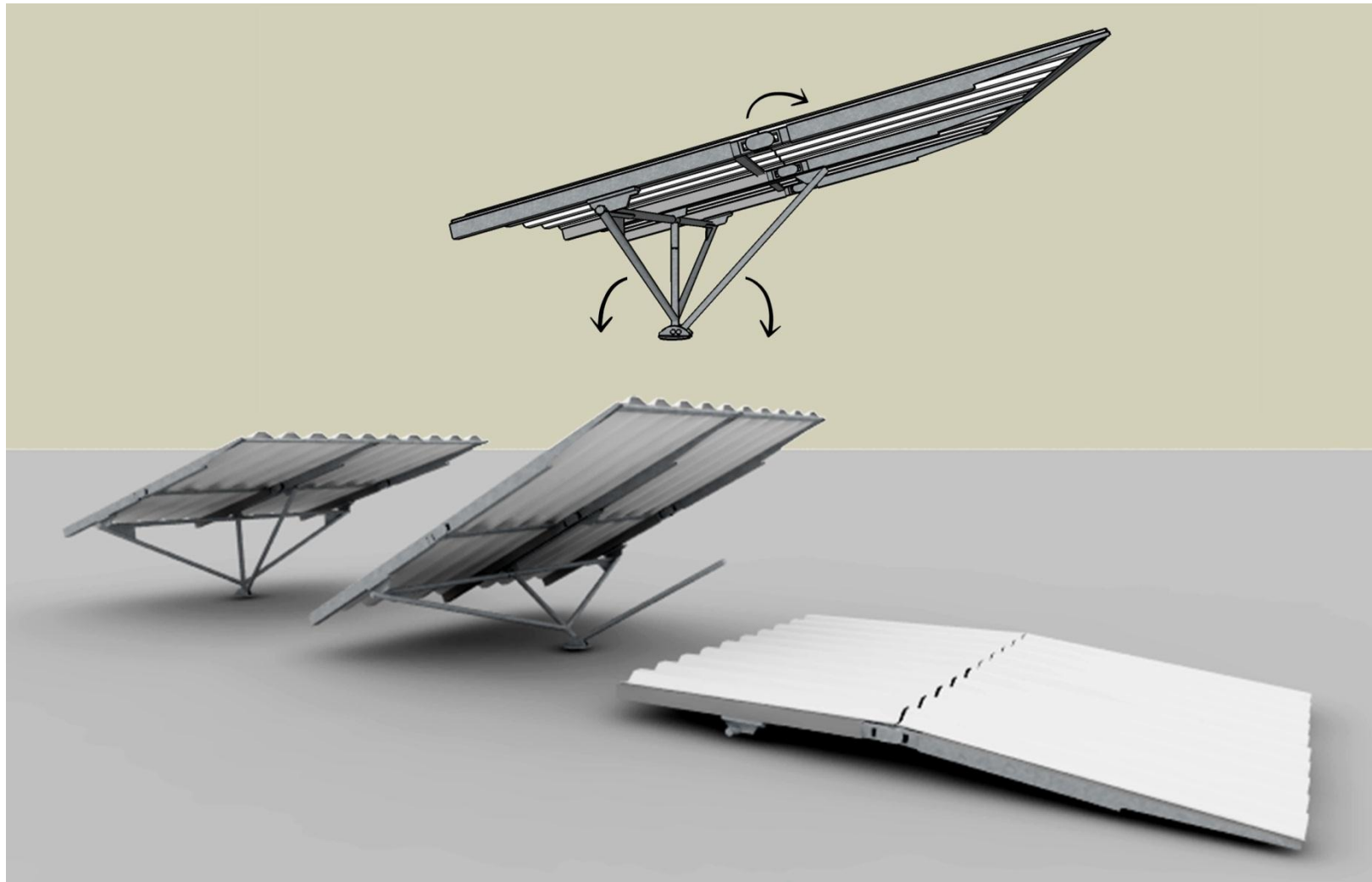


Figura 42. Esquema de mecanismo plegable del sistema de doble cubierta.

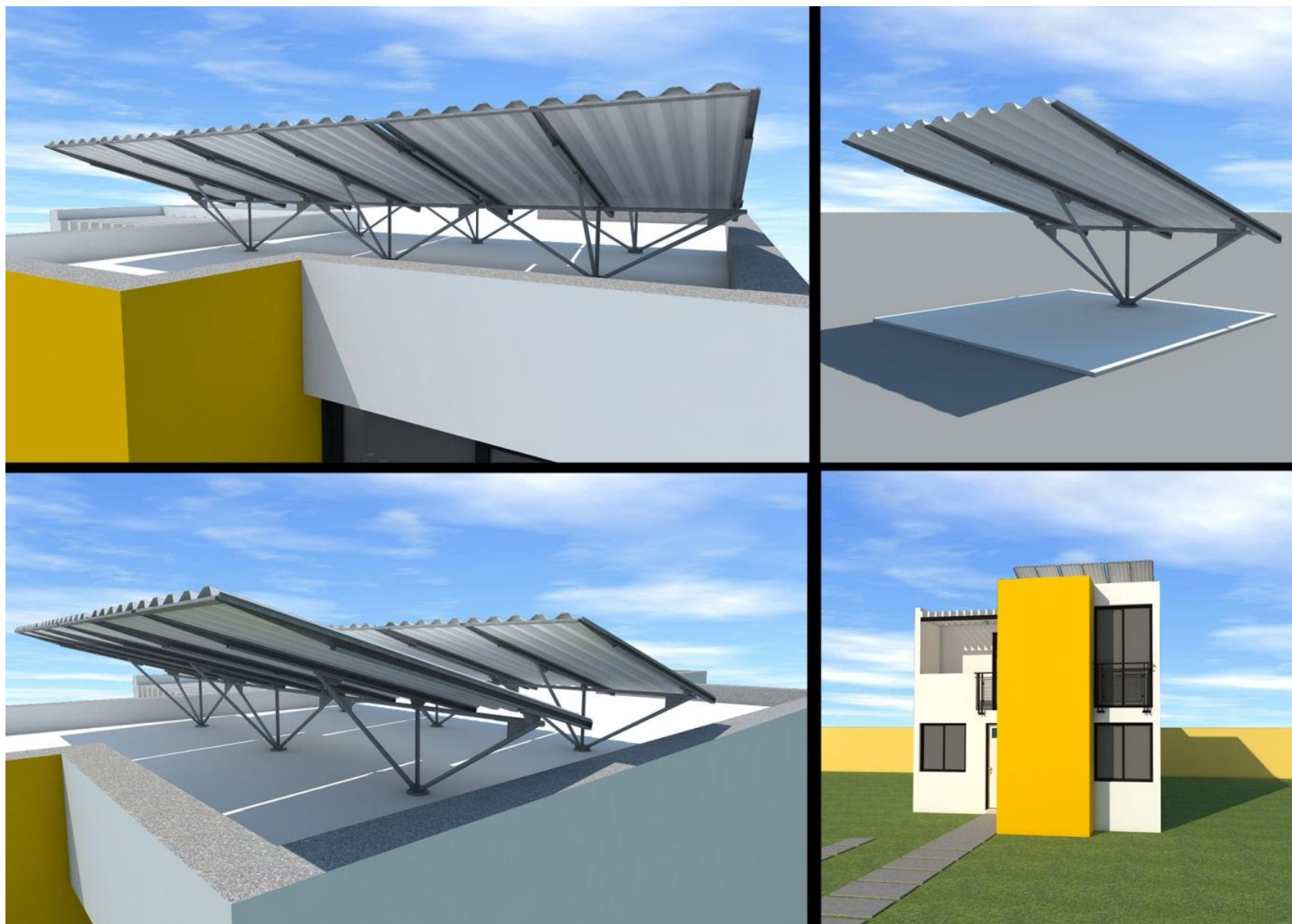


Figura 43. Aplicación del sistema de doble cubierta en una vivienda media.

Bibliografía

- Al-Obaidi, K., Ismail, M., Rahman, A. (2014). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research* 3, pp. 283–297.
- ANSI/ASHRAE (2013). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Asociación Internacional de Fabricantes de Aislantes Reflectantes (comp.) (2002). *Aislante Reflectante, Barreras Radiantes y Capas de Control De Radiación*. RIMA-I
- Atherton, S. (2011). Residential Attic Ventilation In A Hot And Humid Climate: Effects Of Increased Ventilation On Thermal Performance And Moisture Control. (Tesis de Maestría. University of Tennessee)
- Ayuntamiento de Puerto Vallarta, J. (2012). Plan Parcial de Desarrollo Urbano. Dirección de Planeación Urbana Municipal.
- Azqueta, P. (2014). *Manual práctico del aislamiento térmico en la construcción: EPS-Poliestireno Expandido*. Argentina: Asociación Argentina del Poliestireno Expandido (AAPE).
- Baan, I. (2011). Centre de L'architecture en terre [Fotografía]. Recuperado de <http://www.kere-architecture.com/projects/centre-de-larchitecture-en-terre/>
- (2011). National Park of Mali [Fotografía]. Recuperado de <http://www.kere-architecture.com/projects/national-park-bamako/>
- Balocco, C. (2002). A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings* 34(5), pp. 469-475. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00130-X
- Barcelo, C. (s. f.). *Transmisión de calor en los edificios* [En línea]. BVSDE. Recuperado el 28/06/2016 de <http://www.bvsde.ops-oms.org/arquitectura/clase31/clase31.htm>
- Barrios, G., Elías, P., Huelsz, G., Rojas, J. (2010). Selección de materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. *Estudios sobre Arquitectura y Urbanismo del desierto III* (3), pp. 69-84.
- Blender, M. (2015). *La transmisión de calor en edificios* [En línea]. *Arquitectura y Energía*. Recuperado el 28/07/2016 de <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-transmision-del-calor/>
- Campos, L. (2012). Cubiertas y superficies reflectivas en México: Ventajas y potencial de uso. En AEAEE, A.C. (Ed.), *Eficiencia Energética, Superficies Reflejantes en la Envolvente Térmica de Edificaciones*. México: CONUEE.
- Center of Built in the Malay World (KALAM). (1986). [Ilustración]. Recuperado el 10/06/2016 de http://lensahijau.blogspot.mx/2012/10/the-establishment-of-air-house-standard_18.html
- Checa-Artasu, M. (2009). Entre la casa maya y el bungalow: Arquitectura de la frontera México-Belice. *Bitácora Arquitectura* 19, pp. 62-69.
- CONAVI. (2013). *NAMA de Vivienda Existente*. CONAVI, SEMARNAT. Recuperado el 14/12/2015 de <http://www.conavi.gob.mx/viviendasustentable>
- (2016). Sistema Nacional de Información e Indicadores de Vivienda. Recuperado el 13/07/2016 de <http://sniiv.conavi.gob.mx/Reports/INEGI/ParqHab.aspx>
- Cool Metal Roofing Coalition. (2010). *Cool Metal Roofing*. Recuperado el 17/04/2016 de <http://www.wbdg.org/resources/coolmetalroofing.php>

- D'Orazio, M., Di Perna, C., Di Giuseppe, E., Morodo, M. (2013). Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under hot climatic conditions. *Journal of Building Physics* 36(3), pp. 229-246.
- Díaz, O. (2012). *La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: análisis del comportamiento térmico y efecto en el confort del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana*. (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña).
- Durán, V. & Brea, E. (2009). *Arquitectura popular dominicana*. Santo Domingo, República Dominicana: Banco Popular Dominicano. ISBN: 978-99934-67-54-0. Recuperado el 27/06/2016 de https://issuu.com/popularenlinea/docs/arquitectura_popular_en_baja
- Elizondo M., Alcántara, A., Gómez, A. (1990). Edificaciones ambientalmente adecuadas y energéticamente sensatas en ciudades medias de Jalisco; el caso Puerto Vallarta. En Del Toro Gaytán, M. (comp.) (2009). *Edificación Sustentable en Jalisco*, pp. 62-76. Guadalajara, Jalisco: Prometeo Editores.
- Escobar, V. (2003). *Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco*. (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña).
- Evans, M., & De Schiller, S. (1991). *Diseño bioambiental y arquitectura solar*. Buenos Aires: Ediciones Previa núm. 9. FADU, Universidad de Buenos Aires.
- Fajardo, L. (2005). *Desempeño costo-beneficio de dos sistemas pasivos de climatización en cubiertas para climas cálidos-subhúmedo. Caso: Coquimatlán, Colima*. (Tesis de Maestría. Universidad de Colima).
- Fanger, P., Ipsen, B., Langkilde, G., Olesen, B., Christensen, N., Tanabe, S. (1985). Comfort limits for asymmetric thermal radiation. *Energy and Buildings* 8, pp. 225-236.
- Fernández, P. (2015). Ingeniería térmica y de fluidos [En línea]. Recuperado el 27/01/2017 de <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=7>
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A., Galesi, A. (2012). Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings* 49, pp. 611–618.
- Galindo, P. (2010). *Análisis del desempeño térmico en la vivienda de interés social de clima cálido semi húmedo: características morfológicas, espaciales y constructivas*. (Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara).
- Gameros, G. (2007). Agua encapsulada como amortiguador térmico sobre losas de concreto. (Tesis de Maestría. Universidad de Colima).
- Garde, F., Mara, T., Lauret, A., Boyer, H., Cellaire, R. (2001). Bringing simulation to implementation: presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. *Energy and Buildings* 71 (2), pp. 109-120.
- Garza, A. (2015). Casa Cubierta de Comunidad Vivex [Fotografía]. Recuperado de <http://www.archdaily.mx/mx/773375/arquitectura-social-en-mexico-casa-cubierta-de-comunidad-vivex>
- Gómez, V. (2003). *Desempeño solar de viviendas*. (Tesis doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., México).
- González, E. (2003). Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática [En línea]. Recuperado el 17/07/2016 de <http://www.anes.org/anes/formularios/RedesConocimiento/2003-03.pdf>

- & González García, S. (2013). Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanco para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. *Ambiente Construido* 13(4), pp. 149-171. ISSN: 1678-8621.
- Guerra, J. (2003). *Habitar el desierto: Transición energética y transformación del proyecto habitacional colectivo en la ecología del Desierto de Atacama, Chile*. (Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya).
- Guerrero, K. (2011). *La cubierta plana y su comportamiento térmico en las viviendas del clima cálido-húmedo. Caso de estudio: Cuba*. (Tesina de Maestría. Universidad Politècnica de Catalunya).
- Guimarães Merçon, M. (2008). *Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo: Análisis térmico de la cubierta ventilada*. (Tesis de Maestría. Universidad Politècnica de Catalunya).
- Gut, P. & Ackerknech, D. (1993). Climate Responsive Building: Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions [En línea]. St. Gallen, Suiza: SKAT 1993. Recuperado el 09/06/2016 de <http://collections.infocollections.org/ukedu/en/d/Jsk02ce/3.4.html>
- Hall, A. (1988). *American galvanised iron roofing and cladding from the 1870's to 1920's*. (Tesis de Maestría. Graduate School of Arts and Sciences, University of Pennsylvania). Recuperado el 24/06/2016 de <https://archive.org/details/americangalvanis00hall>
- Halwatura, R. & Jayasinghe, M. (2008). Thermal performance of insulated roof slabs in tropical climates. *Energy and Buildings* 40(7), pp. 1153-1160.
- Hernández, B. (1998). SITECH: Una propuesta de techo en lámina metálica para la vivienda de bajo costo. *Tecnología y construcción* 14(2), pp. 47-61.
- Herrera, L., Gómez-Azpeitia, G., González, E. (2014). Porcentaje de horas de confort térmico con técnicas de enfriamiento evaporativo indirecto en techos estanque en clima árido. *Revista Hábitat Sustentable* 4(1), pp. 46-55.
- Huelsz, G., Rechtman, R., Rojas, J. (2009). Altos valores de la resistencia térmica no aseguran un buen desempeño térmico de la envolvente de una edificación. *Memorias de la XXXIII Semana de Energía Solar*, pp. 237-240.
- Incropera, F., De Witt, D., Bergman, T., Lavine, A. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer*. (6th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Inzunza, J. (2002). Física: Introducción a la mecánica. Chile: Universidad de Concepción. Recuperado el 01/07/2016 de <http://old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/fisica/cap14.pdf>
- Jayasinghe, M., Attalage, R., Jayawardena, A. (2003). Roof orientation, roofing materials and roof surface colour: their influence on indoor thermal comfort in warm humid climates. *Energy for Sustainable Development* 7(1), pp. 16-27. [http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60345-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60345-2)
- Kabre, C. (2010). A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics. *Building and Environment* 45, pp. 727-738.
- Kamal, M. A. (2012). An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* 55(1), pp.84-97.
- (2015). Evaporative cooling technique. *Buildotech* 9(7). Recuperado el 14/06/2016 de <http://buildotechindia.com/evaporative-cooling-technique/>
- Kere-Architecture. (2014). Surgical Clinic and Health Center, Burkina Faso [Fotografía]. Recuperado de <http://www.kere-architecture.com/projects/clinic-leo/>

- Koenigsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A., Szokolay, S. (1974). *Manual of tropical housing and building. Part one: climatic design*. Londres: Wiley.
- Lake, 2010. [Fotografía]. Recuperado el 28/06/2016 de <https://blog.quintinlake.com/tag/vernacular-architecture/page/2/>
- Laplace (2015). *Calor y Calorimetría* [En línea]. *Laplace.us.es*. Recuperado el 28/07/2016 de http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetr%C3%ADa
- Lechner, N. (2014). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. (4th ed). John Wiley & Sons, Inc.
- Lee, S., Park, S., Yeo, M., Kim, K. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment* 44(7), pp. 1431–1439.
- Lira-Cortés, L., González, O., Méndez-Lango, E. (2008). Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones. *Símpoio de Metrología*. Santiago de Querétaro, México.
- Lokman, H. (2007). *An evaluation of bioclimatic high rise office buildings in a tropical climate: energy consumption and users' satisfaction in selected office buildings in Malaysia*. (Tesis Doctoral, Universidad de Liverpool, Reino Unido).
- Martín, M. (1996). *Comportamiento Térmico de Cerramientos Soleados: Un Modelo de Simulación por Diferencias Finitas*. (Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).
- (2004). Transmisión del calor [En línea]. Editorial de Construcción Arquitectónica. Recuperado el 28/06/2016 de http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/1_calor/4_transm/
- (2006). *Manual del Calor*. España: Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria. Recuperado el 30/06/2016 de <http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/icaro/Manual-2-CALOR.pdf>
- McCabe, W., Smith, J., Harriott, P. (2007). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen 1*. 7^a Ed. México: McGraw Hill.
- Mendoza, C. (2011). *Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación en México*. (Tesis de Licenciatura. UNAM).
- Mercado, M., Flores, S., Esteves, A., Filippín, C. (2010). Dimensionamiento del panel radiante del sistema de calefacción radiante solar pasivo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14. ISSN 0329-5184
- Michael, A. (2005). Kangaroo Valley House [Fotografía]. Recuperado de <http://www.houzz.es/photos/11359434/kangaroo-valley-house-moderno-fachada-sydney>
- Miller, W., Parker, D., Akbari, H. (2003). *Painted metal roofs are energy-efficient, durable and sustainable*. Recuperado el 30/01/2017 de http://coolmetalroofing.org/wp-content/uploads/2015/05/Painted_Metal_Roofs_TMI_CaseStudy_27.pdf
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). *Los materiales en la construcción de vivienda de interés social*. Díaz, C. & Ramírez, J. (Eds.), AINCOL (Textos). Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (1979). *Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79: Condiciones Térmicas en los edificios*. España. Recuperado el 30/01/2017 de <http://www.ehu.eus/mmtde/materiala/aislamtoedificios/PDF/Documentos/1ARTICUL.pdf>

- Morillón Gálvez, D., Morillón Gálvez, R., & De la Mora, A. (1998) Comportamiento del techo escudo a la radiación solar en Guadalajara. *Memorias de la XXII Semana de Energía Solar*, pp. 35-39. Mexicali, B. C., 1998.
- Netto, R. (2016). *Física - Termodinámica* [En línea]. *Fisicanet.com.ar*. Recuperado el 29/07/2016 de http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/ap03_fuentes_de_energia.php
- Olgyay, V. (1998). *Arquitectura y clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Palomar, D., Acha, C., Lauret, B. (2014). Estrategias bioclimáticas de la arquitectura tradicional étnica vietnamita. *Constelaciones* 2, pp. 131-140. ISSN 2340-177X.
- Parker, D., Sherin, J., & Sonne, J. (2004). Comparative Summer Thermal Performance of Finished and Unfinished Metal Roofing Products with Composition Shingles. *Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*. Richardson, Texas.
- Patiño, V. (1990). *Historia de la cultura material en la América equinoccial, Tomo 2: Vivienda y Menaje*. Bogotá: Instituto Caro y Cuervo. Recuperado el 27/06/2016 de http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/equinoccial_2_vivienda/cap27.htm
- Pilar de Zalazar, C., & Jacobo, G. (2003). Estudio comparativo del comportamiento higrotérmico de cubiertas ventiladas y no ventiladas, para las condiciones climáticas de la región NEA. En *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2003*. Recuperado el 25/09/2015 de <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/07-Tecnologicas/T-014.pdf>
- Piñate, A., Rosales, L., Lorenzo, E. (2014). Estudio experimental de un sistema pasivo de enfriamiento por techo estanque. *Tecnología y Construcción* 29-30, pp. 20-31.
- Ramos, J. (2011). América Latina y el Caribe Arquitecturas bajo lluvias y soles. *Arquitectura y Urbanismo XXXII*. pp. 72-76.
- Rebolledo, D. (2014). *Transferencia de Calor y Materia* [En línea]. Recuperado el 28/07/2016 de <http://tcm-de-fi-unsj.blogspot.mx/p/mc3.html>
- Real Academia Española. (2014). *Sofito*. En *Diccionario de la lengua española* (23.^a ed.) [En línea]. Recuperado el 16/05/2016 de <http://dle.rae.es/?id=YE64IS5>
- (2014). *Bungaló*. En *Diccionario de la lengua española* (23.^a ed.) [En línea]. Recuperado el 28/06/2016 de <http://dle.rae.es/?id=6I2Udlz>
- Serra, R. (1999). *Arquitectura y climas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- & Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Shiraishi, Y., Murakami, S., Kato, S., Kim, T., & Ikaga, T. (2004). Study on thermal shielding effect of double roofing with air passage by coupled simulation of convection and radiation. Ponencia presentada en *21th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Eindhoven, Países Bajos.
- SIEG. (2012). Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco. Puerto Vallarta. Gobierno de Jalisco.
- Society of Building Science Education. (2016). *The Carbon Neutral Design Project: Carbon Neutral Design Strategies*. [En línea]. Recuperado el 05/09/2016 de <http://tboake.com/carbon-aia/strategies1a.html>

- Sosa, M. & Siem, G. (2004). *Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico*. Venezuela: Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción / Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Stagno, B. (2004). La creatividad en el techo bioclimático tropical. *I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável, X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construido*. São Paulo, Julio 18-21, 2004. ISBN: 85-89478-08-4.
- Stuart, M. (2016). Una Guía Práctica para Emisividad en Inspecciones Infrarrojas. Recuperado el 30/01/2017 de https://reliabilityweb.com/assets/uploads/articles/9167/42-46_ir_michael_spanish_2.pdf
- Stulz, R. (1980). Elements of solar architecture for tropical regions [En línea]. HWPSS SKAT Publication No.10. Recuperado el 20/07/2016 de https://archive.org/details/fe_Elements_of_Solar_Architecture_for_Tropical_Places
- & Mukerji, K. (1993). Materiales de construcción apropiados: Catálogo de soluciones potenciales [En línea]. Suiza: SKAT & IT Publications. Primera Edición 1981. Recuperado el 14/06/2016 de <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms00.htm#Contents>
- Sweetser, S. (1987). Roofing for Historic Buildings. *Old House Journal* (En Línea). Recuperado el 24/06/2016 de <http://www.oldhousejournal.com/npsbriefs2/brief04.shtml>
- Vázquez, J., González, E., Elizondo, M. (2008). Cubiertas y estanques para optimizar el sistema pasivo de techo estanque metálico en clima cálido seco extremo: estudio experimental exploratorio. *Palapa III*, pp. 43-54. ISSN: 1870-7483
- Virgen, C. & Gauna, C. (2011). Información económica y demográfica de la región Puerto Vallarta - Bahía de Banderas: Datos para la toma de decisiones. *TURyDES*, 4(10).
- Zhang, T., Tan, Y., Yang, H., Zhang, X. (2016). The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied Energy* 165, pp. 707-734. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.108

Anexos

Anexo 1: Prueba piloto: Transferencia de calor a través de la lámina galvanizada

Objetivo: Analizar la transferencia de calor a través de la lámina galvanizada sometida a la acción de la radiación infrarroja, y determinar la variación de la temperatura irradiada respecto a la distancia de la lámina dentro de un módulo experimental (Figura 44).

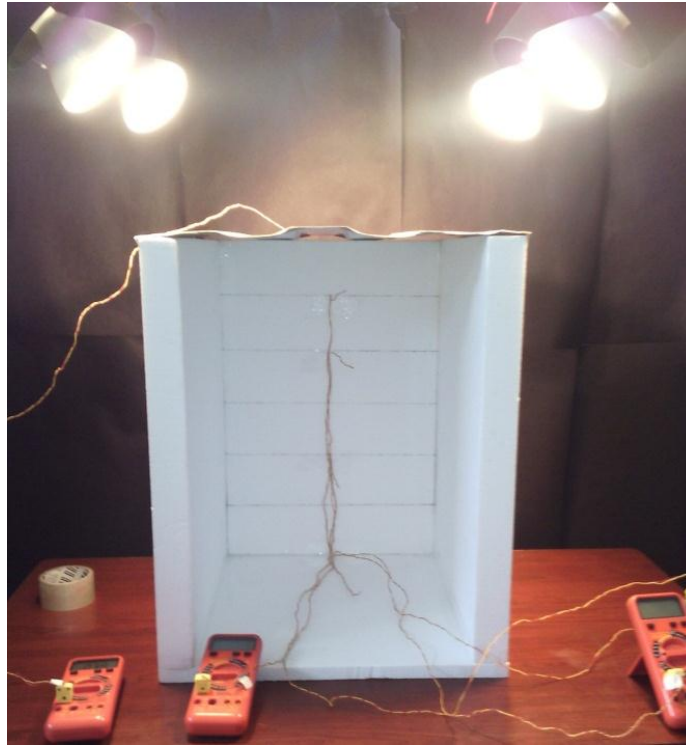


Figura 44. Montaje de prueba piloto.

Materiales:

- Módulo experimental de 50 cm x 50 cm de base por 60 cm de altura con base y paredes de placas de poliestireno expandido de 5 cm de espesor, y tapa de lámina galvanizada de 50 cm x 50 cm con acabado pinto color blanco.
- Medidor de condiciones medioambientales modelo Kestrel 4100 Pocket Air Flow Tracker.
- 3 Multímetros digitales marca Wavetek Meterman modelo 23XT.
- 5 termopares.
- Simulador de radiación solar, el cual cuenta con 4 lámparas infrarrojas de 375 W. Localizado en el laboratorio de termofluidos de la UAM Azcapotzalco,
- Cronómetro.

Método:

- Se instalaron los termopares de la siguiente manera: uno en el centro de la tapa de lámina (pegado a la superficie externa) y los cuatro restantes de forma paralela al interior del módulo experimental a una distancia de 10, 20, 40 y 60 cm.
- Se colocó el módulo experimental en el centro del simulador de radiación solar con las 4 lámparas dirigidas hacia la tapa de lámina galvanizada, procurando la iluminación uniforme en el total de su superficie.
- Se encendió el simulador, registrando las condiciones ambientales y la hora iniciales.
- Se contabilizó tiempo que le llevó a la lámina alcanzar una temperatura de 60°C en su superficie.
- Una vez que la lámina alcanzó una temperatura de 60°C se registraron simultáneamente las temperaturas que indicaron los 4 termopares instalados al interior del módulo.
- Se registraron las temperaturas después de 6 minutos de encender el simulador.
- Registro del tiempo que tardó en estabilizarse la temperatura superficial de la lámina.
- Registro de la hora y temperatura ambiente finales del experimento.

Resultados:

Hora de inicio: 12:08 p.m.

Condiciones ambientales iniciales:

- Temperatura ambiente: 21°C
- Humedad relativa: 65%

Tiempo que tardó la lámina en alcanzar 60°C: 4:20 min.

Temperaturas interiores:

- 10 cm: 29.3°C
- 20 cm: 26.7°C
- 40 cm: 23.6°C
- 60 cm: 23.3°C

Condiciones pasados 6:20 min.

- Temperatura sobre la lámina: 62.8°C
- Temperatura ambiente: 21.4°C
- Humedad relativa: 64%

Temperaturas interiores:

- 10 cm: 30.3°C
- 20 cm: 27.4°C
- 40 cm: 23.8°C
- 60 cm: 23.8°C

Después de aproximadamente 12:00 min, la temperatura de la lámina dejó de aumentar, con las siguientes condiciones:

- Temperatura sobre la lámina: 64.4°C
- Temperatura ambiente: 21.4°C
- Humedad relativa: 64%

Temperaturas interiores:

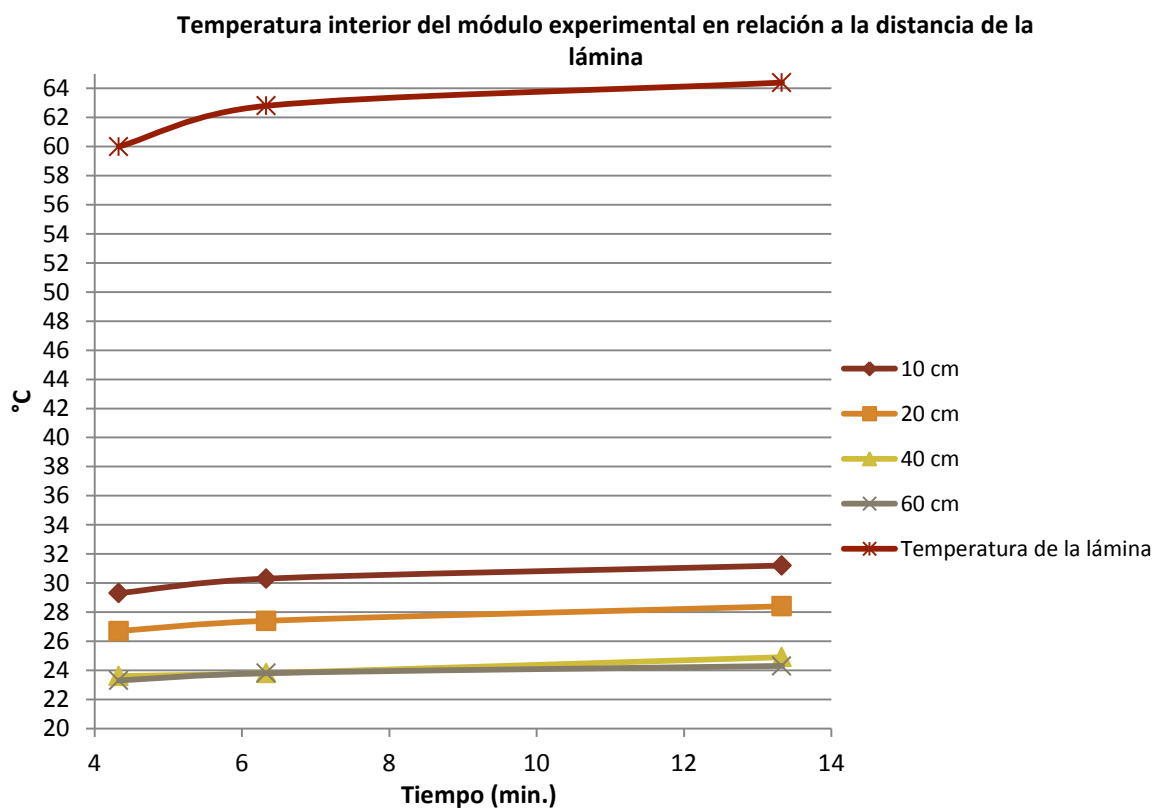
- 10 cm: 31.2°C
- 20 cm: 28.4°C
- 40 cm: 24.9°C
- 60 cm: 24.3°C

Hora final: 12:20 p.m.

Condiciones ambientales finales:

- Temperatura ambiente: 21.4°C
- Humedad relativa: 64%

Los resultados obtenidos se ilustran en la Gráfica 38.



Gráfica 38. Registro de temperaturas en el módulo experimental de la prueba piloto.

Observaciones:

El experimento se realizó en un módulo experimental hecho de material aislante con el objetivo de mantener en su interior la mayor cantidad posible del calor emitido por la lámina metálica.

La lámina metálica absorbe calor rápidamente, pero pasados unos minutos el aumento de temperatura es más gradual y permanece relativamente estable.

Aún con el aumento de temperatura de la superficie de la lámina hasta los 64.4°C, la temperatura a una distancia de 10 cm llegó a un máximo de 31.2°C, lo que supone una diferencia de 33.2°C.

La temperatura mínima registrada dentro del módulo es un poco más elevada que la temperatura ambiente, la diferencia promedio es de 2.7°C.

En las tres mediciones la diferencia de temperatura entre los 10 cm y 20 cm de distancia fue en promedio 2.7°C, y entre los 20 cm y los 40 cm fue de 3.4°C, pero la temperatura entre los 40 cm y los 60 cm varió solamente 0.3°C en promedio.

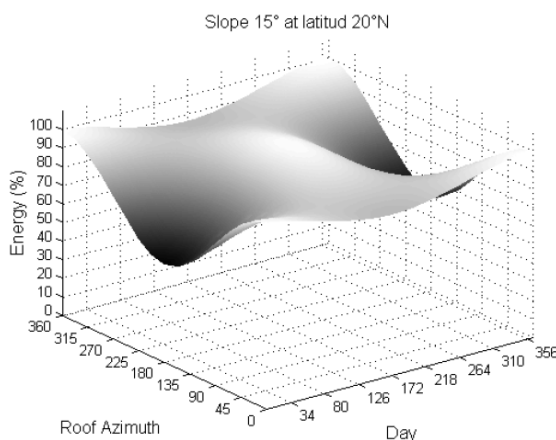
Aún cuando la lámina galvanizada alcanzó elevadas temperaturas superficiales, la temperatura a poca distancia dentro del módulo (10 cm) presenta una diferencia considerable. Esta variación de la temperatura con relación a la distancia de la lámina se hizo menos evidente después de los 40 cm, pero alcanzó una diferencia de hasta 40°C respecto a la temperatura superficial de la lámina.

La lámina metálica es un material con alta conductividad térmica por lo que la transferencia de calor a través de ella se realiza en un tiempo muy reducido, sin embargo al estar en contacto con el ambiente pierde calor rápidamente y el aire en contacto con ella no aumenta su temperatura en forma considerable.

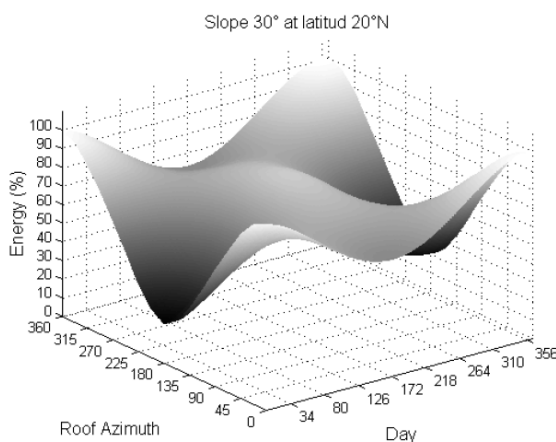
Anexo 2: Variaciones porcentuales de la energía sobre un techo inclinado proveniente de la radiación solar directa¹³.

Las siguientes gráficas fueron desarrolladas por Gómez Muñoz (2003) en una investigación sobre el desempeño solar de viviendas, y se utilizaron en el presente trabajo para determinar la orientación e inclinación de las cubiertas a comparar en la fase experimental.

En cada una de las gráficas, referida a una latitud de 20°N e inclinación del techo determinada, el cien por ciento se asigna al máximo de la energía en MJ/m² para todos los días del año y todas las orientaciones posibles del techo.

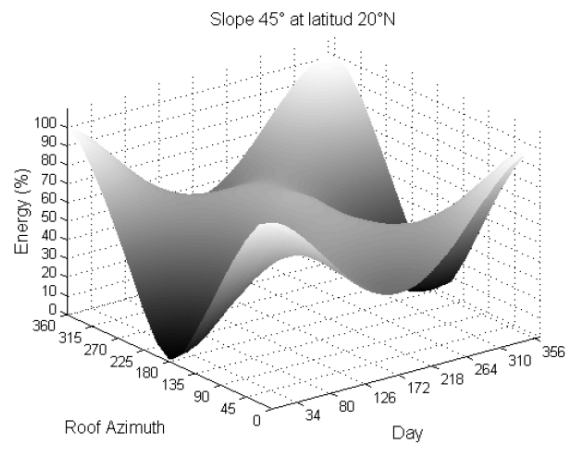


Gráfica 39. Energía solar directa sobre un techo inclinado 15° a una latitud de 20°N durante todo el año. Fuente: Gómez, 2003.



Gráfica 40. Energía solar directa sobre un techo inclinado 30° a una latitud de 20°N durante todo el año. Fuente: Gómez, 2003.

¹³ Gómez Muñoz, V. (2003). Desempeño solar de viviendas. (Tesis doctoral, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz, Baja California Sur, México).



Gráfica 41. Energía solar directa sobre un techo inclinado 45° a una latitud de 20°N durante todo el año. Fuente: Gómez, 2003.

Anexo 3: Simulación del flujo de viento a través de los módulos experimentales

La ventilación es la estrategia principal de enfriamiento en un clima cálido húmedo como el de Puerto Vallarta, uno de los objetivos de diseño principales del sistema de doble cubierta ventilada fue aprovechar la dirección y velocidad del viento para remover el aire caliente que se pudiera acumular en el espacio entre la segunda cubierta y la losa, y así evitar que se transmita al interior. A continuación se presentan los resultados de la simulación del efecto del viento sobre los módulos experimentales bajo condiciones de velocidad promedio diaria similares a las de Puerto Vallarta, realizada en el software Flow Design, el cual es un túnel aerodinámico virtual que permite modelar el flujo de aire alrededor de conceptos de diseño.

Se ajustaron las medidas del túnel de viento según las dimensiones del modelo; el espacio entre el túnel de viento y el modelo, a lo ancho y a lo alto, es de aproximadamente dos veces la dimensión del modelo. A lo largo, en dirección del flujo, el túnel se extiende en sotavento aproximadamente dos veces la longitud del modelo, y cuatro veces en barlovento. De esta manera se garantiza que los límites del túnel no afecten el flujo que se aproxima al modelo, y permite la formación de la estela de viento.

Los vientos predominantes en Puerto Vallarta provienen del Suroeste, con una velocidad promedio diaria de 1.63 m/s, condiciones que fueron utilizadas para realizar las simulaciones, la Figura 45 muestra el resultado obtenido para el módulo ME1, donde se observa el ingreso de aire por la parte más baja de la segunda cubierta, ubicada al Sur, produciéndose una aceleración del flujo alcanzando una velocidad de hasta 2.9 m/s. También es notorio que se origina una zona de muy baja velocidad justo por debajo de la cubierta, la cual incrementa su velocidad después de atravesar el módulo.

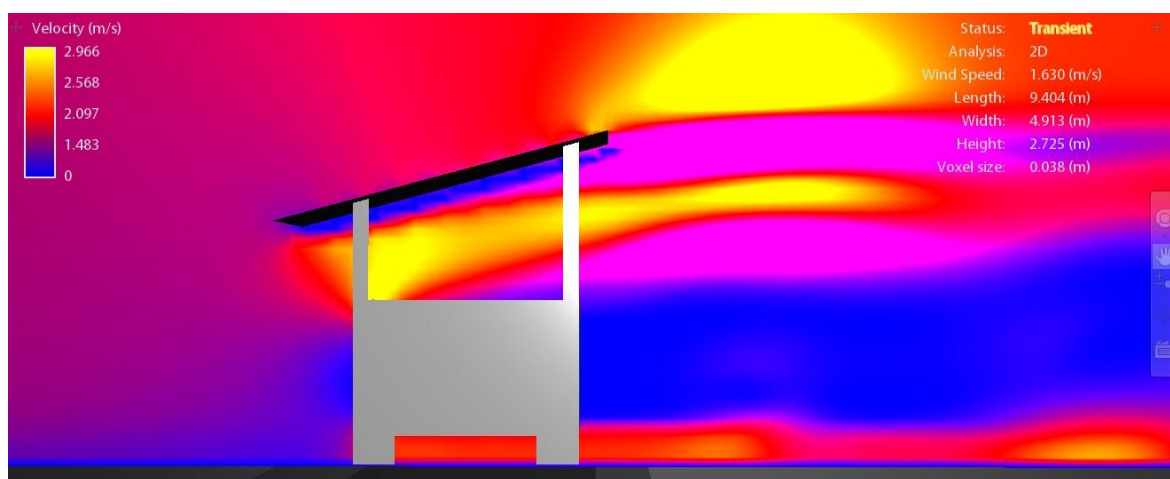


Figura 45. Simulación del flujo del viento sobre el módulo ME1.

La simulación del módulo ME2 bajo los mismos parámetros, se muestra en la Figura 46, de igual forma se muestra el ingreso de la corriente de aire por la cara Sur del modelo que lo atraviesa produciendo una

aceleración del flujo, con una velocidad de hasta 2.3 m/s, también por encima de la cubierta. A diferencia del módulo ME1, en este se observa que el aire justo debajo de la cubierta se acelera mientras atraviesa el modelo, aunque alcanza una menor velocidad de salida.

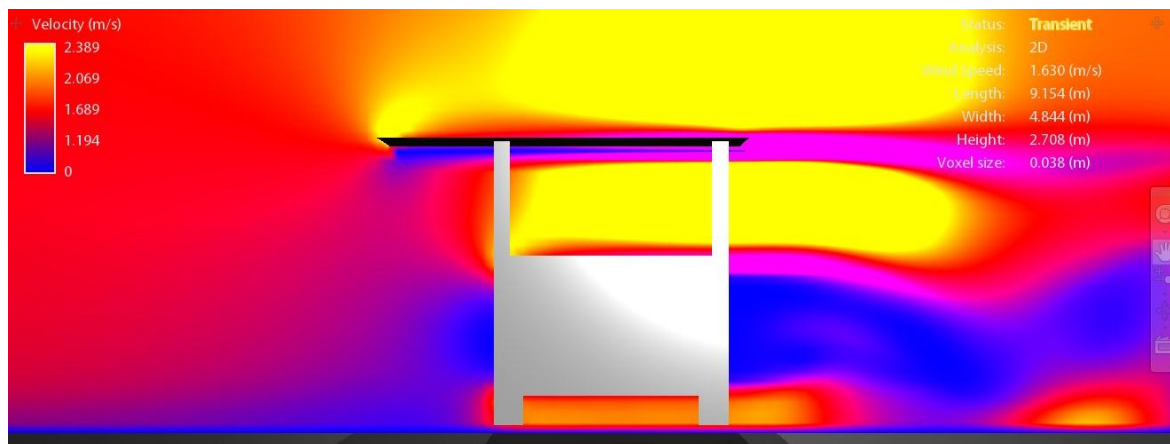
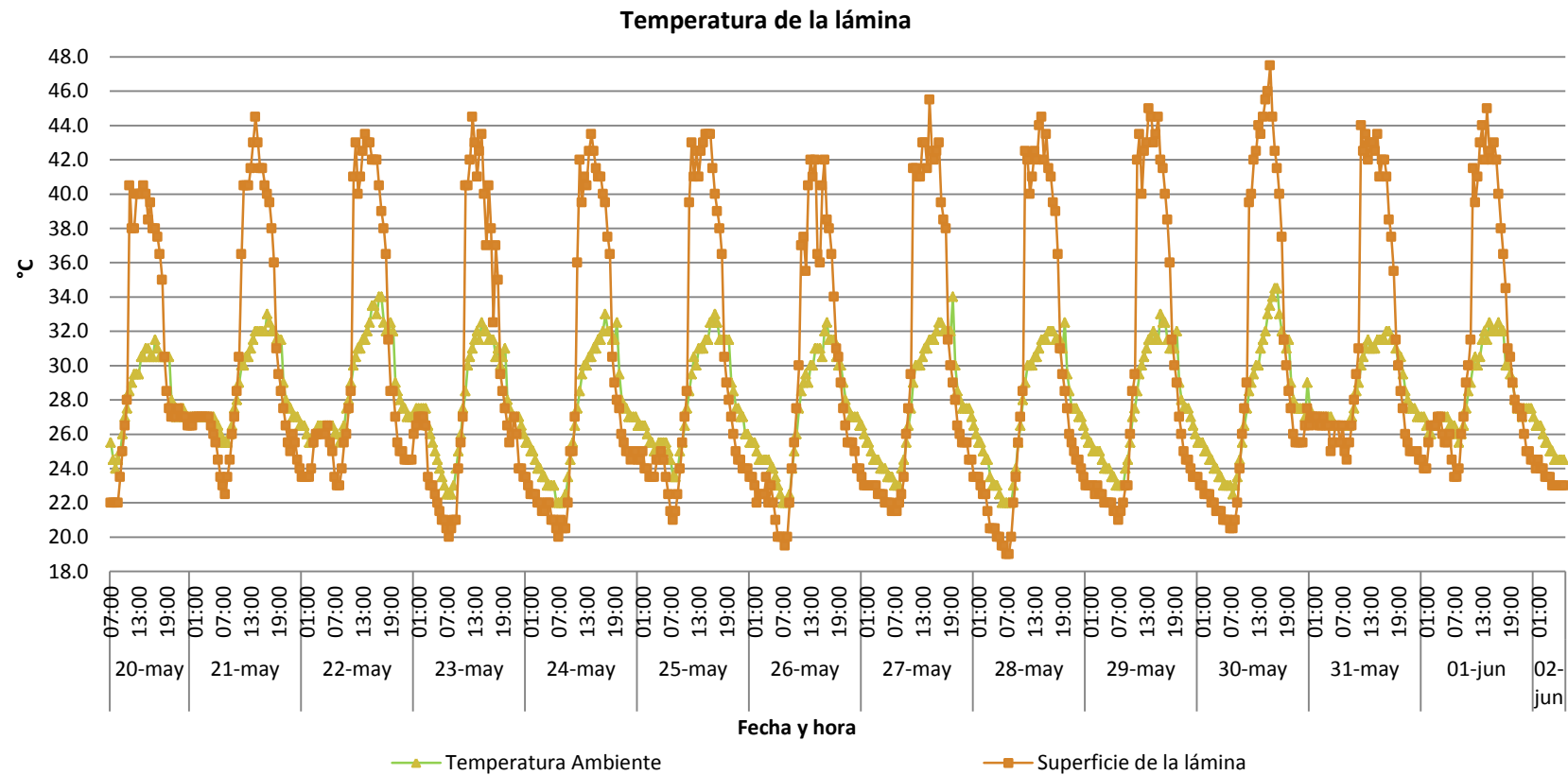


Figura 46. Simulación del flujo del viento sobre el módulo ME2.

Cabe señalar que las simulaciones de viento realizadas son puramente dinámicas y no contemplan el efecto de la temperatura del aire y del calor irradiado por la cubierta metálica sobre el flujo de aire, pero permite el entendimiento y análisis de los patrones del flujo de viento a través y alrededor de la doble cubierta.

Anexo 4: Temperatura superficial de la lámina metálica



Gráfica 42. Temperatura superficial de la lámina metálica en primavera.